

SÉRIE A N° 97

N° d'ordre

117

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

M. Augustin FRIGON

INGÉNIEUR ÉLECTRICIEN

PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

1^{re} THESE. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LES PERTES D'ÉNERGIE DANS QUELQUES
DIÉLECTRIQUES INDUSTRIELS SOUMIS A UNE DIFFÉRENCE DE POTENTIEL SINUSOÏDALE

2^e THESE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 1^{er} Juillet 1922, devant la Commission d'examen

MM. PAUL JANET..... *Président*

CH. FABRY..... }
M. GUICHARD .. } *Examineurs*



12, PLACE DE LABORDE, PARIS (VIII^e)

1922

SÉRIE A N° 97

N° d'ordre

117

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

M. Augustin FRIGON

INGÉNIEUR ÉLECTRICIEN

PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

1^{re} THESE. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LES PERTES D'ÉNERGIE DANS QUELQUES
DIÉLECTRIQUES INDUSTRIELS SOUMIS A UNE DIFFÉRENCE DE POTENTIEL SINUSOÏDALE

2^e THESE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 1^{er} Juillet 1922, devant la Commission d'examen



MM. PAUL JANET. *Président*

CH. FABRY.
M. GUICHARD .. } *Examineurs*



12, PLACE DE LABORDE, PARIS (VIII^e)

1922

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen..... MOLLIARD, *Professeur*, Physiologie végétale.

Doyen honoraire... P. APPELL.

*Professeurs hono-
raires*..... { P. PUISEUX.
VÉLAIN.
BOUSSINESQ.
BOUTY.

	Emile PICARD...	Analyse supérieure et algèbre supérieure.
	Gaston BONNIER.	Botanique.
	KÖNIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et calcul intégral.
	HALLER.....	Chimie organique.
	JOANNIS.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	JANET.....	Electrotechnique générale.
	WALLERANT.....	Minéralogie.
	ANDOYER.....	Astronomie.
	PAINLEVÉ.....	Mécanique analytique et mécanique céleste.
	HAUG.....	Géologie.
	H. LE CHATELIER.	Chimie générale.
	Gabriel BERTRAND	Chimie biologique.
	Mme P. CURIE...	Physique générale et radioactivité.
	CAULLERY.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés)
	C. CHABRIÉ.....	Chimie appliquée.
	G. URBAIN.....	Chimie minérale.
	Emile BOREL...	Calcul des probabilités et Physique mathém.
	MARCHIS.....	Aviation.
	Jean PERRIN...	Chimie physique.
	G. PRUVOT.....	Anatomie et physiologie comparées.
	ABRAHAM.....	Physique.
	CARTAN.....	Mécanique rationnelle.
	CL. GUICHARD...	Géométrie supérieure.
<i>Professeurs</i>	LAPICQUE.....	Physiologie.
	GENTIL.....	Géographie physique.
	VESSIOT.....	Théorie des groupes et calcul des variations.
	COTTON.....	Physique générale.
	DRACH.....	Application de l'analyse à la géométrie.
	C. FABRY.....	Physique.
	Charles PÉREZ...	Zoologie.
	Léon BERTRAND..	Géologie appliquée et géologie régionale.
	DANGEARD.....	Botanique (Enseignement P. C. N.).
	LESPIEAU.....	Théories chimiques.
	LEDUC.....	Physique théorique et physique céleste.
	MONTÉL.....	Mathématiques générales.
	MAURAIN.....	Physique du globe.
	HÉROUARD.....	Zoologie.
	Rémy PERRIER...	Zoologie (Enseignement P. C. N.)
	SAGNAC.....	Physique théorique et physique céleste.
	RABAUD.....	Biologie expérimentale.
	PORTIER.....	Physiologie.
	BLAISE.....	Chimie organique.
	PÉCHARD.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	AUGER.....	Chimie analytique.
	M. GUICHARD...	Chimie minérale.
	GUILLET.....	Physique.

Secrétaire..... Daniel TOMBECK.

A MON PÈRE

A MA FEMME



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550422_0012

A Monsieur Paul JANET

Membre de l'Institut, professeur à la Sorbonne

Hommage de vive gratitude

PREMIÈRE THÈSE

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

SUR LES

PERTES D'ÉNERGIE DANS QUELQUES DIÉLECTRIQUES INDUSTRIELS

SOU MIS A UNE

DIFFÉRENCE DE POTENTIEL SINUSOÏDALE

« INTRODUCTION. — On sait depuis longtemps déjà que les diélectriques s'échauffent, lorsqu'on les soumet à l'action d'un champ électrique variable.

» Le plus souvent, on désigne le phénomène sous le nom générique d'« hystérésis diélectrique », sans bien savoir s'il s'agit d'une hystérésis réelle, d'une viscosité ou si plusieurs causes n'existent pas conjointement.

» Intimement lié au phénomène d'absorption, l'hystérésis diélectrique a fait l'objet d'un certain nombre de recherches expérimentales et d'études théoriques. Malheureusement, le problème est très compliqué, de par sa nature même et à cause de la grande variété et de la complexité des diélectriques qui sont à la portée des expérimentateurs.

» Nous n'entreprendrons pas de faire l'historique de la question et encore moins de discuter les travaux qui ont été faits jusqu'à présent. Cette étude, pour être intéressante, devrait consister

en une critique séparée de tous les mémoires importants publiés sur la question. Nous nous contenterons de dire quelques mots sur les méthodes expérimentales qui ont été employées ⁽¹⁾.

» Les premiers expérimentateurs surtout ont mesuré l'échauffement lui-même, soit par l'intermédiaire du phénomène de dilatation, soit par l'élévation de température, soit enfin directement au moyen du calorimètre.

» D'autres ont tiré profit de l'entraînement qui se produit lorsqu'on soumet un corps à hystérésis, libre de se mouvoir, à l'action d'un champ électrique variable dans l'espace.

» Bon nombre ont voulu étudier le phénomène plus intimement et ont établi de véritables cycles d'hystérésis diélectrique par la méthode du point. Tout comme en magnétisme, la surface de la courbe qui représente la charge en fonction du champ, lorsque celui-ci parcourt un cycle de valeurs positives et négatives, est proportionnelle à l'énergie perdue à chaque cycle par hystérésis et par viscosité. Pour le relevé de ces cycles, on a utilisé avec avantage des dispositifs mécaniques qui établissent des contacts au moment voulu, le tube de Braun et même des méthodes indirectes partant de relevés à l'oscillographe.

» On s'est aussi servi, pour des travaux importants, de montages en pont, plus ou moins compliqués, qui permettent de déterminer la valeur de la résistance équivalente à l'hystérésis que l'on désire mesurer. Mais ces ponts qui fonctionnent bien en basse tension et particulièrement aux fréquences téléphoniques, peuvent difficilement être utilisés aux tensions élevées.

» Depuis quelques années surtout, on a employé avec avantage les méthodes wattmétriques directes, en utilisant soit l'électromètre, soit l'électrodynamomètre.

⁽¹⁾ Nous donnons à la fin de ce travail une bibliographie par ordre chronologique, accompagnée de quelques notes. Nous espérons que le lecteur intéressé pourra, de la sorte, se faire rapidement une idée d'ensemble de l'histoire de la question.

On trouvera un bon exposé des méthodes expérimentales employées antérieurement à 1902 dans l'étude de MERCANTON, « Contribution à l'étude des pertes d'énergie dans les diélectriques », édité par Corbaz et Cie, Lausanne, 1902.

Pour une étude comparative des différentes théories qui ont été émises, voir : GROVER, The capacity and phase difference of paffined paper condensers as function of temperature and frequency, *Bulletin of the Bureau of Standards*, vol. VIII, 1911.

On trouvera aussi une remarquable bibliographie sur tous les aspects de la question dans RAYNER, High-voltage tests and energy losses in insulating materials, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. XLIX, 1912.

» S'appuyant sur ces travaux expérimentaux, quelques théories ont été émises. La première en date est celle des résidus de Maxwell (2). La plus intéressante parmi les dernières est celle de Décombe (47), qui est conduit à attribuer les pertes dans les diélectriques à une viscosité propre de l'atôme. Aucune théorie émise jusqu'ici n'a pu mériter une sanction générale.

» Malgré tous ces travaux, dont plusieurs sont vraiment remarquables, on ne sait encore rien de précis sur la nature du phénomène, et on ne sait que très peu de choses sur ses particularités. On n'est même pas absolument certain qu'il existe pour les corps parfaitement homogènes. Dans le cas des corps hétérogènes, on est à peu près d'accord pour dire que les pertes sont dues, en partie du moins, à une hystérésis soit réelle, soit visqueuse. D'ailleurs, dans son ensemble, le phénomène ressemble beaucoup à celui de l'hystérésis magnétique ; c'est, du reste, à cette similitude qu'il doit son nom. Les quelques lois qualitatives que l'on a pu énoncer ne s'appliquent qu'à des cas particuliers et les lois quantitatives sont encore à établir d'une façon satisfaisante.

» La question est donc loin d'être épuisée et ce n'est qu'en accumulant les constatations expérimentales que l'on parviendra à serrer la vérité de plus près et à fournir aux théoriciens les matériaux nécessaires à l'établissement de lois plus précises. En attendant, les résultats ainsi obtenus peuvent être utilisés pour les besoins de l'électrotechnique, dans les limites imposées par l'étendue des travaux dont ils sont tirés.



» OBJET DE CETTE ÉTUDE. — Nous nous sommes donné pour objet l'étude des pertes d'énergie dans les diélectriques, considérées dans leur ensemble, par une méthode de mesure aussi simple et aussi directe que possible, à des gradients de potentiel élevés, et pour des variations importantes de la tension et de la fréquence du courant utilisé, de la température et de l'épaisseur du diélectrique essayé.

» A cet effet, nous avons utilisé un électrodynamomètre sensible, employé directement, sans circuit de compensation et sans transformateur de tension. Nous discuterons sérieusement cette méthode un peu plus loin.

» Notre but sera atteint si nous réussissons à montrer les

« possibilités » de cette méthode et si les quelques chiffres et les courbes que nous avons obtenus peuvent offrir quelque intérêt théorique et pratique.

» Un grand nombre de matières ont déjà été étudiées par divers expérimentateurs : paraffine, micas, huiles, papiers imprégnés, isolants industriels de toutes natures. Nous nous étions, au début, tracé un programme comprenant l'étude d'un de ces corps complexes et celle de ses parties constituantes. Malheureusement, nous avons été forcé de consacrer tellement de temps à organiser nos expériences et à mettre au point notre méthode de mesure, que nous avons dû nous limiter considérablement.

» Nous avons donc fait une étude des pertes dans les papiers imprégnés utilisés par les fabricants français de câbles électrique (¹). Nous avons, dans nos expériences, fait varier la température entre 0° à 125° C ; la tension entre 5 000 et 25 000 v ; le gradient de potentiel de 1 700 à 22 500 v:mn ; la fréquence entre 20 et 60 p:s; l'épaisseur du diélectrique entre 0,6 et 3 mm, avec un rayon de courbure compris entre 3 et 20 mm.

**

» MÉTHODE DE MESURE. — Comme nous le disons plus haut, les wattmètres électrostatiques et les wattmètres électrodynamiques permettent de mesurer directement les pertes globales dues à l'application d'une différence de potentiel alternative sur un condensateur ayant pour diélectrique celui que l'on désire étudier.

» L'électromètre à quadrants, employé comme wattmètre, offre une grande sensibilité et permet l'étude de petits échantillons. Il n'existe pas cependant sur le marché d'appareils pouvant être utilisés sur des circuits de tension élevée. Il faut avoir recours à des appareils étudiés et construits spécialement, auxquels on donne les caractéristiques appropriées. Des travaux importants ont été ainsi faits sur des isolants industriels et ont donné de bons résultats.

» On peut, plus facilement, utiliser les wattmètres électrodyna-

(¹) Nous avons aussi fait quelques essais sur la matière d'imprégnation employée dans la fabrication de certaines de nos éprouvettes, ainsi que sur un condensateur en papier paraffiné isolé pour 40 000 v. Les courbes que nous avons ainsi obtenues sont absolument semblables à celles que nous discutons plus loin.

miques de fabrication courante sur des circuits de haute tension, mais alors leur sensibilité relativement faible exige que l'on opère sur de gros condensateurs ou sur une certaine longueur de câbles électriques.

» Il existe, cependant, une marque d'électrodynamomètre à miroir, d'une grande sensibilité.

» Le Laboratoire central d'Electricité, où nos essais ont été faits, en possède un exemplaire. C'est celui dont nous nous sommes servi ; il présente les caractéristiques suivantes :

» Sensibilité : $2,7 \times 10^{-9} \times R$ watts par millimètre de déviation, R étant la résistance du circuit en dérivation.

» Enroulement série (fixe) :

295 ohms.

0,4 henry.

0,1 ampère.

» Enroulement en dérivation (mobile) :

184 ohms.

0,013 henry.

0,05 ampère.

» Nous avons transformé l'appareil de façon à modifier ces constantes qui sont devenues :

» Sensibilité : $7 \times 10^{-9} \times R$ watts par millimètre de déviation.

» Enroulement série (mobile) :

184 ohms.

0,013 henry.

0,05 ampère.

» Enroulement en dérivation (fixe) :

147 ohms.

moins de 0,2 henry.

0,1 ampère.

» Nous avons adopté le montage indiqué par la figure 1.

» Nous croyons utile, plus loin, de nous étendre un peu sur la discussion des erreurs particulières à cette méthode, et sur les moyens que nous avons pris pour en tenir compte. Nous espérons ainsi éviter beaucoup de tâtonnements et de perte de temps, à ceux qui voudraient adopter le même procédé.

» Avant d'entreprendre cette discussion, rappelons, pour fixer les idées, que le problème expérimental à résoudre est le suivant:

» *Mesurer à des tensions qui peuvent varier de 5 000 à 25 000 volts des pertes de l'ordre du dixième de watt, dépensées dans un condensateur d'environ un millième de microfarad. L'intensité du courant est donc de l'ordre du millième d'ampère, et il est déphasé de plus de 89° en avant sur la tension.*

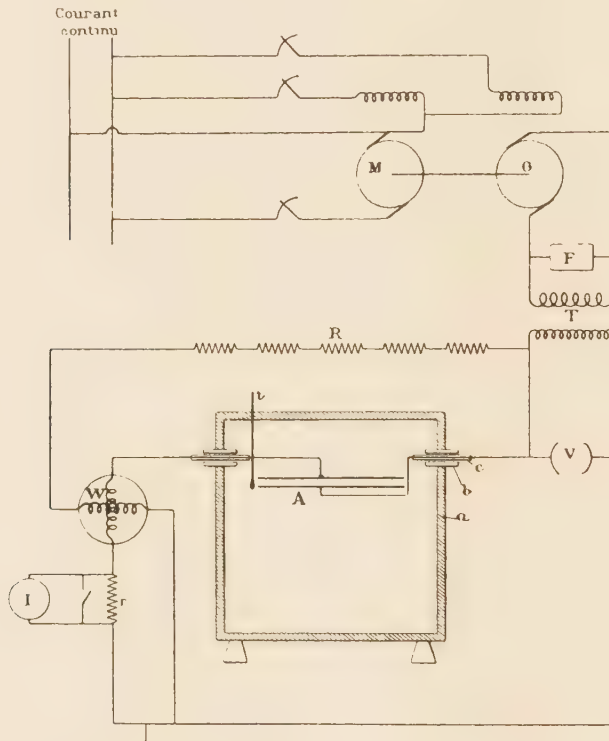


Figure 1. — Schéma d'ensemble du montage pour la mesure des pertes. M, Moteur à courant continu, à vitesse variable, pourvu de poulies de différents diamètres ; G, Alternateur ; T, Transformateur 250-25 000 volts ; a, Etuve chauffée au moyen de résistances, avec contrôle par bobines de self-induction ; b, Tube d'ébonite ; c, Tube de verre ; t, Thermomètre placé à la hauteur de l'éprouvette ; F, Fréquencemètre, système Frahm ; R, Résistance variant de 100 000 à 1 000 000 ohms ; W, Electrodynamomètre ; I, Electromètre Moulin ; r, Résistance aux bornes de laquelle est placé l'électromètre I ; V, Electromètre Abraham-Villard, de 0 à 40 000 volts ; A, Eprouvette.

» Toutes nos mesures n'ont évidemment pas été faites dans ces conditions, puisque nous avons enregistré des pertes de plus de 3 watts et des déphasages de 75° et même moins, mais c'est la détermination de ces faibles pertes sous un grand déphasage qui constitue le problème difficile de notre étude.

» DISCUSSION DES ERREURS ⁽¹⁾. — Il y a deux grandes causes d'erreurs particulièrement à craindre. Il faut bien s'assurer que les pertes mesurées sont exclusivement celles qui sont dues au condensateur étudié, et d'autre part, il faut être bien certain que l'angle de phase entre le courant et la tension au condensateur est bien celui qui agit sur l'électrodynamomètre. (59)

» Tandis que la puissance à mesurer est très faible, celle qui est dépensée par effet Joule dans le circuit potentiel peut atteindre plusieurs centaines de watts. Le montage dit « en amont » était donc le seul possible.

» Nous supposons d'abord que nous disposons d'une tension parfaitement sinusoïdale. Considérons en premier lieu les pertes qui peuvent s'ajouter à celles que nous voulons mesurer. Dans le montage amont, les pertes par effet Joule dans la bobine série sont indiquées par le wattmètre. Il est facile d'en tenir compte en soustrayant de la lecture, corrigée des autres erreurs, la puissance ainsi dépensée, calculée par la formule RI^2 . Dans nos mesures, même dans les cas les plus défavorables, cette erreur n'atteint pas 0,3 pour 100. Pour presque toutes, elle est absolument négligeable, à cause des faibles intensités et de la résistance relativement peu élevée de l'appareil. Il suffit de bien surveiller les contacts et l'isolement du reste du circuit, pour n'avoir rien à craindre d'autres pertes de ce genre. ⁽²⁾

» Dans la mesure de valeurs aussi faibles, on pourrait aussi craindre des pertes par courants de Foucault dans les pièces métalliques qui composent l'électrodynamomètre. L'appareil dont nous nous sommes servi a été étudié à ce point de vue ; aucune partie métallique ne se trouve à proximité des circuits, toutes les pièces voisines étant en os ou autre matière isolante.

» Les causes qui agissent sur l'angle de phase sont autrement

⁽¹⁾ Cette discussion s'applique surtout aux cas les plus sujets à erreur : faible puissance, grand déphasage. A mesure que les pertes augmentent et que l'angle diminue, l'importance des erreurs devient beaucoup moins grande.

⁽²⁾ A titre de simple curiosité, nous signalons un petit incident de nos mesures. Tout au début, nous avions employé des chaînes pour relier électriquement entre eux les plateaux de condensateurs à air, utilisés pour certaines vérifications. Ces chaînes sont utiles pour relier entre elles différentes parties d'un circuit susceptibles de se déplacer pendant l'expérience. Normalement, elles ne devraient pas présenter d'inconvénients sur des circuits traversés par de faibles courants à haute tension. Nous nous sommes vite aperçu qu'elles introduisaient ici une grande erreur, à cause sans doute de la multiplicité des contacts en série.

importantes. On sait, par exemple, que la self-induction du circuit en dérivation a pour effet de diminuer le courant qui traverse ce circuit et de réduire en quelque sorte la sensibilité. Elle a surtout pour résultat de déphaser ce courant sur la tension principale du circuit, ce qui affecte la valeur du couple moyen produit sur la partie mobile.

» Pour faire disparaître cette erreur il faut multiplier la lecture par un facteur de correction, la puissance mesurée a alors pour expression :

$$P = P' \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \psi'}{1 + \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \psi'}$$

où P désigne la puissance dépensée dans le circuit principal, y compris les pertes dans le circuit en série ; P' la puissance indiquée par l'appareil ; ψ , l'angle de déphasage du circuit principal (du condensateur) ; ψ' , l'angle de déphasage du circuit en dérivation de l'appareil.

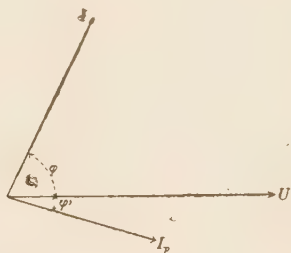


Figure 2. — Diagramme montrant l'influence de la self-induction du circuit en dérivation. U , Tension totale ; I , Courant à travers l'éprouvette ; I_p , Courant dans le circuit en dérivation.

» Si on néglige $\operatorname{tg} \psi'$, cette formule peut se mettre sous la forme souvent plus commode :

$$P = P' + UI \left(\frac{L \omega}{R} \right) \sin \psi,$$

où U est la tension du circuit ; I , le courant à travers de l'éprouvette, et L , le coefficient de self-induction du circuit en dérivation.

» Le diagramme de la fig. 2 indique clairement comment les choses se passent.

» Le déphasage étant augmenté, la correction doit être en plus, comme l'indiquent nos formules.

» La self-induction du circuit en dérivation de notre électro-

dynamomètre était de 0,1 henry environ et la résistance du circuit variait de 100 000 et 1 000 000 ohms. Nous pouvons, pour des raisons dont l'évidence apparaîtra plus loin, négliger la self-inductance et la capacité des boîtes de résistances utilisées, qui toutes étaient d'excellente construction et étudiées spécialement à cet effet. Le déphasage dans le circuit en dérivation peut donc être considéré sans effet appréciable.

» Etant donnée la valeur élevée de la tension, il n'y a pas lieu de tenir compte de l'induction mutuelle entre les deux circuits de l'appareil. Mais cette induction mutuelle rend impossible l'emploi d'un shunt pour modifier la sensibilité de l'électrodynamomètre ; nous avons pu nous en rendre compte expérimentalement. Il faut donc avoir recours à la résistance du circuit dérivé pour changer la sensibilité.

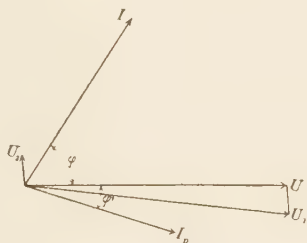


Figure 3. — Diagramme montrant l'influence de la self-induction du circuit en dérivation et du circuit série. U_s , tension aux bornes de la bobine série ; U_1 , tension aux bornes du condensateur.

» Il est bon de remarquer de plus, que la tension U du circuit n'est pas celle qui apparaît aux bornes du condensateur essayé, à cause de la présence du circuit série de l'électrodynamomètre. Le diagramme de tout à l'heure prend l'aspect de la figure 3.

» La chute de potentiel V_2 est de l'ordre du dixième de volt, tandis que U n'est jamais moindre que 5 000 volts. L'angle d'erreur est donc très petit et négligeable. Les choses se passent ainsi, à condition cependant que l'on ne tienne pas compte de la résistance r . Cette résistance a atteint 10 000 ohms dans bon nombre de mesures et son effet était très marqué sur les lectures. Nous avons donc dû faire nos mesures en deux mouvements : une lecture du wattmètre avec la résistance r en court-circuit, suivie d'une lecture du courant à l'électromètre. Il y a là évidemment une source d'erreur accidentelle à cause de la lecture non simultanée des deux grandeurs. Cette erreur est faible et il n'y a pas de moyens de l'éviter. L'allure

régulière des courbes que nous avons obtenues, nous justifie d'admettre qu'elle n'a pas eu grand effet sur nos résultats.

» Il existe une autre cause d'erreur dont on n'a pas à tenir compte d'habitude, mais qui exige une attention toute spéciale dans notre cas. Il s'agit de la capacité des boîtes de résistances du circuit de l'enroulement en dérivation de l'électrodynamomètre, et, plus exactement, de la capacité de tout ce qui compose ce circuit, par rapport au sol. Afin de protéger les appareils et l'expérimentateur, et aussi pour faire disparaître toute force électrostatique nuisible, on est conduit à mettre un point du circuit à la terre. L'expérience nous a montré que, dans notre cas, c'était le point commun aux deux circuits de l'appareil de mesure qui était le plus propice à cette fin.

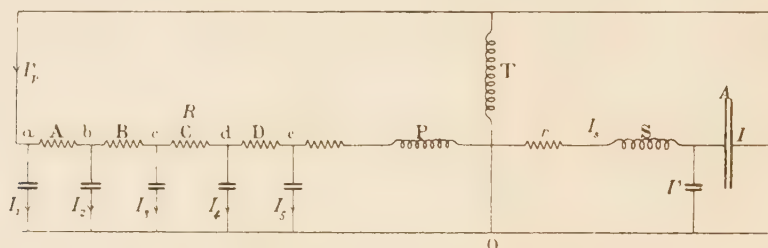


Figure 4. — Schéma de la partie principale du montage de la figure 1, transformé de façon à indiquer la capacité des circuits par rapport au sol.

» Pour les besoins de la discussion, le montage peut être représenté par le schéma de la figure 4, qui n'est qu'une simple transformation de la partie principale de la figure 1, à laquelle nous avons ajouté des condensateurs, pour représenter la capacité du circuit en dérivation et du circuit en série par rapport au sol. Seul le circuit en dérivation nous intéresse pour le moment.

» Si nous remarquons que les courants I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 sont en quadrature sur les différences de potentiel oe, od, oc, ob, oa , et que les chutes de tensions dans les boîtes A, B, C, D, E, sont en phase avec l'intensité du courant qui traverse ces boîtes, nous pouvons tracer le diagramme, représenté par la figure 5.

» Le courant I_p qui traverse la bobine du circuit en dérivation devrait être en phase avec la tension totale U ou oa . On voit que l'effet de la capacité par rapport au sol est de créer un déphasage en arrière, c'est-à-dire de produire le même résultat que si le circuit dérivé avait une certaine self-induction. Si l'on ne prend pas la précaution de disposer convenablement les différentes

parties du montage, cet effet peut, dans certains cas, masquer complètement l'effet principal et rendre négatives les déviations de l'appareil. On peut vérifier le circuit relativement à cette erreur, en opérant à blanc sur de bons condensateurs à air. Les corrections une fois faites, l'appareil doit alors indiquer zéro. Pour faire disparaître cette cause d'erreur, nous avons été forcé de suspendre les boîtes de résistances à une certaine distance du sol, dans une vaste pièce voisine de celle où nous expérimentions.

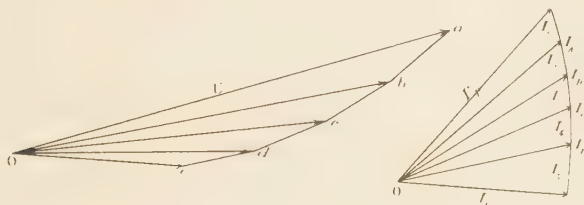


Figure 5. — Diagramme montrant l'influence de la capacité par rapport au sol, du circuit en dérivation.

» Nous avons dit qu'il y avait une chute de tension de quelques dixièmes de volts dans le circuit-série de l'électrodynamomètre. Cette tension peut créer par rapport au sol un effet de capacité dont les conséquences sont indiquées sur le diagramme de la figure 6. Evidemment, en essai normal, cette erreur est négligeable, mais lorsque nous avons voulu nous servir de résistances en série sur des condensateurs à air pour vérifier nos circuits, comme nous l'expliquerons plus loin, nous avons dû met-

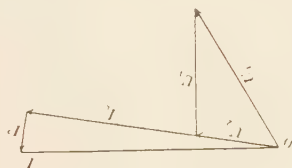


Figure 6. — Diagramme montrant l'influence de la capacité par rapport au sol, du circuit série.

tre ces résistances du côté haute tension du condensateur, car la capacité, par rapport au sol, de boîtes de gros volume, introduisait une erreur appréciable.

» Jusqu'à présent, nous n'avons pas trouvé de cause d'erreur qui exige une correction des lectures. Cependant, une discussion théorique n'a pas été suffisante et il nous a fallu, expérimentalement, passer beaucoup de temps à vérifier l'exactitude de

nos mesures. Nous avons utilisé à cet effet six plateaux de condensateurs à air, ayant la forme des plateaux de l'électromètre Abraham-Villard de grand modèle, et des résistances élevées à self-induction et à capacité négligeables. Par un emploi judicieux de ces appareils, on peut obtenir le déphasage que l'on veut, dans certaines limites, et atteindre pratiquement la quadrature.

» Ce n'est qu'après de nombreux tâtonnements sur la disposition la plus appropriée à donner aux différentes parties des circuits, pour éliminer les effets de capacité et d'induction mutuelle, que nous sommes arrivé à obtenir des résultats satisfaisants.

» Toutes ces vérifications ont été faites avec la sensibilité maximum de l'appareil. Lorsque nous avons été sûr que tout allait bien, nous avons diminué cette sensibilité de plus de moitié et nous avons de nouveau vérifié le bon fonctionnement du montage.

» Il reste une autre cause d'erreur que nous avons constatée, et que nous avons dû laisser subsister faute de moyens de correction, mais qui, heureusement, n'est pas très importante. Nous voulons parler de la perte par effluves. Ces pertes se produisent principalement sur les bords des armatures de l'éprouvette. Nous verrons plus loin que nous avons adopté une forme d'éprouvette qui réduit les effluves au minimum. Nous ne pouvions pas songer à plonger continuellement nos échantillons dans l'huile ; mais au moyen d'essais effectués rapidement, dans l'air puis dans l'huile, nous avons pu nous rendre compte que l'erreur ne devait pas dépasser 2 à 3 pour 100. Nous sommes donc avertis que nos mesures sont entachées de cette erreur aux tensions élevées. On se rendra compte par la suite que ceci n'a pas une grande importance.

» Jusqu'ici, nous avons supposé que la différence de potentiel aux bornes du transformateur était sinusoïdale. Une analyse à l'oscillographe, faite par la méthode ordinaire de résonance, à vide et en régime d'essai, nous a permis de représenter de la façon suivante la force électromotrice de notre source d'énergie :

$$U' = U \sin \omega t + 0,025 U \sin 5 \omega t + 0,01 U \sin 7 \omega t + 0,007 U \sin 11 \omega t$$

» Nous signalons ici la nécessité de tenir compte, dans une détermination de cette nature, de la variation de la résistance apparente des bobines de self-induction à mesure que la fré-

quence augmente, ainsi que des pertes dans les condensateurs utilisés pour obtenir la résonance (61). On peut facilement faire une erreur de 50 pour 100 sur l'amplitude des harmoniques, si on néglige ce point.

» Pour des raisons mises en évidence par le développement mathématique, lorsque l'on fait agir une différence de potentiel qui présente des harmoniques sur un circuit qui ne comprend que des capacités, des self-inductions et des résistances, la puissance absorbée par ce circuit est égale à la somme des puissances que produiraient, dans le même circuit, chaque harmonique agissant séparément. On a donc :

$$P = \sum U_n I_n \cos \psi_n.$$

» Pour des raisons identiques, le couple moyen qui agit sur l'électrodynamomètre est égal à la somme des couples, dus à à chaque harmonique, considérée séparément. En se rapportant aux formules déjà énoncées, on a les relations :

$$P' = \sum P'_n \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \psi'_n}{1 + \operatorname{tg} \psi_n \operatorname{tg} \psi'_n}$$

$$P = P' + \sum U_n I_n \operatorname{tg} \psi'_n \sin \psi_n.$$

» Si les circuits contenaient à la fois de la self-induction et de la capacité, cette correction serait très difficile à calculer. Mais dans notre cas, on peut négliger la capacité du circuit en dérivation ; de plus, la réactance de self-induction est faible par rapport à la réactance de capacité dans le circuit principal. On peut donc admettre d'une part, que la tangente du petit angle de déphasage du circuit de dérivation est proportionnelle à la fréquence et, d'autre part, que le sinus de l'angle du circuit principal est constant et égal à l'unité. On peut donc écrire :

$$a = \frac{U_n}{U} \quad U_n = a U \quad I_n = n a I$$

$$\sin \psi_n = \sin \psi \quad \operatorname{tg} \psi'_n = n \operatorname{tg} \psi'$$

d'où
$$P = P' + U I \operatorname{tg} \psi' \sin \psi + U I a^2 n^2 \operatorname{tg} \psi' \sin \psi.$$

» Et dans le cas de plusieurs harmoniques :

$$P = P' + U I \operatorname{tg} \psi' \sin \psi (1 + \sum a^2 n^2).$$

» Le calcul numérique montre encore ici que ces erreurs peuvent être négligées. Pour plus le vérifier, nous avons fait une série de mesures en alimentant tour à tour le montage par la source habituelle et par un alternateur, dont la courbe est excel-

lente. Il nous a été impossible de trouver une différence entre les deux cas.

» Les erreurs calculables de nos essais sont donc toutes trop faibles pour qu'il y ait lieu d'en tenir compte. Elles agissent d'ailleurs dans un sens et dans l'autre et s'éliminent en partie. Nous croyons avoir suffisamment réduit l'importance des autres erreurs, par une étude expérimentale soignée des conditions d'essais. Il est donc assez difficile, dans ces conditions, de spécifier numériquement l'ordre de grandeur de la précision de nos résultats. Sous toutes réserves, notre impression est que l'erreur totale ne doit pas dépasser 10 pour 100, y compris celles dues aux autres appareils utilisés pour la mesure de l'intensité, de la tension et de la fréquence. Il est évident que l'erreur maximum possible sur un point donné, peut dépasser cet ordre de grandeur.

» D'ailleurs, il est juste de ne pas attacher trop d'importance à la valeur numérique des erreurs, *pourvu toutefois que nous soyons assurés qu'elles restent dans des limites admissibles*, c'est que nos mesures ont surtout pour objet de nous faire connaître l'allure des phénomènes plutôt que la valeur absolue de chaque quantité mesurée. Ce sont donc les courbes que nous établirons qui présentent le plus d'intérêt. Or, les erreurs pour les points situés à la partie supérieure des courbes sont en général très faibles et peuvent franchement être négligées, tandis que le peu de précision que l'on obtient dans le tracé de la partie inférieure des courbes rend illusoire tout calcul compliqué qui n'aurait pour but qu'une vague correction d'une erreur de 2 ou 3 pour 100, au maximum.

*
**

» PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES. — Nous avons fait nos essais sur des éprouvettes, de forme cylindrique, en papier imprégné, tel qu'il est employé par les fabricants de câbles électriques.

» La forme cylindrique a l'avantage de réduire au minimum la périphérie des armatures du condensateur et de diminuer ainsi considérablement les pertes par effluves, pour une surface de condensateur donnée. Elle permet une fabrication facile et robuste de l'éprouvette, et se rapproche, en outre, du mode d'emploi ordinaire de ces diélectriques, ce qui présente certains avantages au point de vue pratique.

» Voici comment ces éprouvettes ont été préparées. Sur un

cylindre, en carton pour les diamètres de 20 mm et en bois pour les diamètres plus petits, on plaçait un papier d'étain mince, destiné à former l'armature intérieure du condensateur. Cette armature était reliée à un conducteur qui sortait par l'extrémité du tube pour établir le contact électrique. Sur ce papier d'étain, ainsi que sur tout le reste du cylindre, on enroulait en spirale une bande de papier de façon à obtenir l'épaisseur voulue ; ce papier étant composé de manille et de pulpe de bois chimique. L'ensemble était alors imprégné sous le vide à une température dépassant 125° C, l'imprégnation durant environ 48 heures. La matière d'imprégnation est principalement composée de résine et de vaseline. La proportion entre ces deux corps n'est pas très bien définie, mais elle peut être d'environ 25 pour 100 de résine et 75 pour 100 de vaseline, dans le cas des deux premiers groupes d'éprouvettes que nous décrivons plus loin.

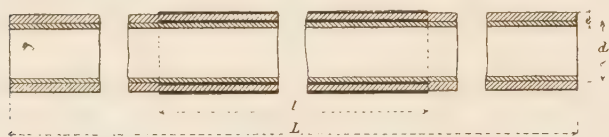
» Une fois le diélectrique préparé, l'éprouvette était, dans la plupart des cas, mise dans un tube de plomb scellé pour empêcher l'humidité de pénétrer dans le diélectrique avant l'essai. Au moment de faire l'essai, une nouvelle armature était placée sur la surface du cylindre en regard de la première. Il est important que les deux armatures se superposent aussi exactement que possible, car nous avons constaté que s'il en est autrement, il se forme sur le diélectrique, en regard de la plus grande surface, une nappe d'effluves qui agit comme une véritable armature. Il est donc impossible de modifier la capacité de l'éprouvette en faisant varier la surface d'une des armatures du condensateur. L'armature extérieure ainsi en place, nous la recouvrons d'un guipage, afin d'assurer un contact aussi parfait que possible entre la couche métallique et le diélectrique. En utilisant un papier d'étain très mince et en appliquant énergiquement le ruban de toile, nous avons obtenu d'excellents résultats.

» Nous remercions très vivement les maisons qui ont bien voulu se charger de la préparation de ce matériel et MM. leurs Ingénieurs, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail. Sans leur aide, il nous aurait été impossible de le conduire à bonne fin.

» Nous avons eu de la sorte quatre échantillonnages différents. Voici les caractéristiques des quatre groupes d'éprouvettes correspondants. Nous ne mentionnons ici que les éprouvettes dont il est question dans ce mémoire.

TABLEAU I

Groupe	Numéro de l'éprouvette d'essai	Dimensions				Nombre de couches de papier
		d	e	L	I	
		exprimés en millimètres				
A	1	20	2	70	40	12
	2	20	2	70	40	12
	3	20	1,5	70	40	11
	4	20	2	60	20	12
	5	20	2	70	40	12
	6	6	3	70	40	22
	7	6	3	70	40	22
	8	9	3	70	40	22
	9	9	3	70	40	22
	10	14	3	70	40	22
B	11	14	3	70	40	22
	12	20	3	70	40	22
	13	20	3	70	40	22
	14	40	3	60	20	22
	15	40	3	60	20	22
	16	40	3	60	20	22
	17	20	2	70	40	16
C	18	20	3	70	40	15
	19	20	3	70	40	16
D	20	20	3	70	40	10
	21	20	3	70	40	10



Les éprouvettes des groupes A et B avaient une tension de percement de 55 000 volts, en moyenne.

Les numéros 17 et 21 ont été percés respectivement à 49 000 et 52 000 v. Le numéro 19 a résisté jusqu'à 85 000 v.

Les éprouvettes des groupes A et B ont pratiquement la même composition, mais, comme elles ont été préparées à des époques différentes par un procédé industriel, il est fort possible qu'elles n'aient pas exactement les mêmes proportions de matières premières ou la même qualité de papier. Ces deux groupes se trouvent composés du diélectrique généralement employé pour la fabrication des câbles électriques de basse tension.

La matière d'imprégnation des groupes C et D contenait beaucoup plus de résine que celle des deux premiers groupes.

» CONSTANCE DU PHÉNOMÈNE. — Nous avons commencé nos recherches par une étude de la constance du phénomène. Il était important de savoir, dès le début, si nous devions nous attendre à retrouver des résultats identiques dans des conditions identiques et de savoir comment les pertes par hystérésis dans le diélectrique sont affectées par une application prolongée de la

tension et, par conséquent, quelle influence la durée d'une mesure peut avoir sur les résultats. Nous avons d'ailleurs fait bon nombre de déterminations de cette nature à différentes époques, durant nos essais.

» Nous résumons sous forme de courbes (fig. 7 et fig. 8) le résultat de l'application prolongée de la tension sur quelques éprouvettes. On voit que les pertes ne sont pas rigoureusement

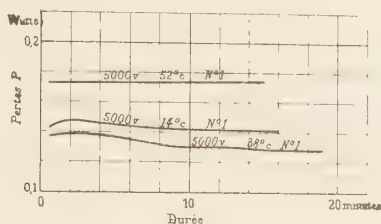


Figure 7. — Variation des pertes en fonction du temps, pour l'éprouvette N° 1.

constantes et que, dans certains cas, elles peuvent se modifier considérablement. Toutefois, on retrouve généralement les valeurs initiales après un repos suffisamment prolongé.

» Il est probable que l'échauffement du diélectrique intervient pour beaucoup dans ce phénomène, mais il ne l'explique pas entièrement cependant, car, dans bien des cas, la variation des pertes se produit dans un sens opposé à celui que produirait une élévation de température. Le corps subit évidemment certaines modifications. Il est possible, par exemple, que sous l'effet du

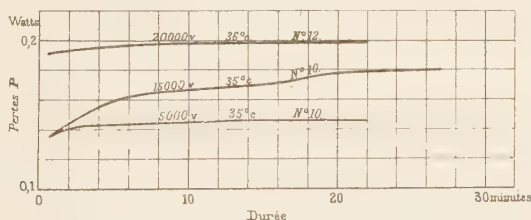


Figure 8. — Variation des pertes en fonction du temps, pour les éprouvettes N° 10 et N° 12.

phénomène de dilatation et, sous l'influence des forces produites par le champ électrique, la position relative des divers éléments du diélectrique se modifie. La chose semble assez probable et nous sommes porté à attribuer à la même cause d'autres anomalies que nous avons observées au cours de nos expériences.

» Dans ces conditions, nous avons adopté comme règle, de toujours faire nos lectures aussi rapidement que possible et de

laisser un intervalle d'au moins deux minutes entre chacune d'elles. En général, la lecture d'un point (comportant une lecture à l'électrodynamomètre et une lecture à l'électromètre) prenait environ 45 secondes, étant donnée la période des appareils de mesure et le temps requis pour ajuster la tension et la fréquence. Si pour une raison quelconque, nous nous attardions plus longtemps qu'une minute et demie, nous interrompons le courant pour reprendre la lecture quelques minutes plus tard. Nous considérons cette précaution comme importante et nous avons obtenu des résultats plus constants après nous y être astreint.

» Le tableau II donne le résultat de mesures ainsi faites dans des conditions identiques, mais à des époques différentes. Les lignes des différents groupes sont dans l'ordre chronologique. Chaque groupe correspond à une éprouvette différente.

» Nous avons consigné dans ce tableau, non seulement des exemples de variations ordinaires, mais aussi des cas extrêmes pour lesquels les valeurs se sont beaucoup modifiées avec le temps.

TABLEAU II

Intervalle	Perte P exprimé en watts	Valeur en centièmes de la valeur initiale	Capacité C en dix-millièmes de microfarads	Valeur en centièmes de la valeur initiale	Cos φ exprimé en centièmes	Valeur exprimé en centièmes
O	1,95	100	8,70	100	3,17	100
24 heures	1,75	89,7	8,68	99,7	2,88	90,8
72 heures	1,40	71,8	8,67	99,6	2,26	71,2
A	3,23	100	3,16	100	1,29	100
	3,11	96,2	3,16	100	1,24	96,2
A	3,39	100	3,18	100	1,36	100
	3,07	90,5	3,18	100	1,23	90,5
A	3,05	100	3,24	100	1,20	100
	3,14	103	3,24	100	1,23	103
A	1,81	100	2,60	100	2,22	100
	1,70	94	3,02	116	1,79	80,7
A	1,55	100	2,64	100	0,747	100
	1,49	96,1	2,65	100	0,716	96,1
96 heures	1,74	112	2,67	101	0,828	111
A	1,24	100	8,32	100	1,89	100
	1,19	96,0	8,32	100	1,82	96,0
24 heures	0,936	75,5	8,72	105	1,27	67,2
72 heures	0,867	69,9	8,75	105	1,26	66,7
B	4,72	100	3,74	100	2,57	100
	4,86	103	3,74	100	2,64	103

» La deuxième ligne des groupes A, correspond à des essais faits quelques minutes après qu'une série de mesures à potentiel variable eut été faite sur la même éprouvette, la première ligne correspond au point de départ de la série.

» Le groupe B donne les chiffres correspondants à deux essais faits à 24 heures d'intervalle, sur une éprouvette maintenue à une température constante de 34° C.

» On voit que des valeurs déterminées dans des conditions identiques peuvent varier considérablement entre elles.

» Il paraît donc bien inutile de chercher à atteindre une grande précision dans des mesures de ce genre. Il faut se contenter d'étudier l'allure générale des phénomènes. C'est dans cet esprit que nous présentons les résultats de nos recherches.

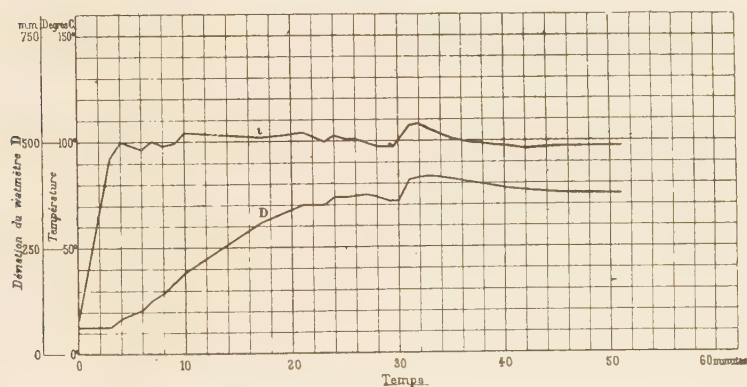


Figure 9. — Retard de la température de l'éprouvette sur la température de l'étuve. La température de régime de l'éprouvette est obtenue, lorsque les pertes restent constantes. Epreuve N° 2.

» Avant de terminer cette question de l'influence du temps, nous voulons indiquer les résultats d'un essai fait en vue de déterminer le retard de la température d'une éprouvette sur la température de l'étuve dans laquelle elle est plongée (fig. 9). L'étude simultanée de la courbe de température et de celle des pertes (déviations du wattmètre), nous montre que celles-ci atteignent leur valeur de régime au bout d'environ 27 minutes. Cette expérience a été faite avec une éprouvette qui avait deux millimètres d'épaisseur.

» Nous nous sommes inspiré de cet essai et d'autres semblables, pour faire en sorte que le temps alloué pour modifier la

température des éprouvettes en cours d'essai, fut amplement suffisant.

**

» **RÉSISTANCE OHMIQUE EN HAUTE TENSION.** — La mesure des résistances se font généralement à une tension qui ne dépasse pas quelques centaines de volts. Il n'est pas absolument certain, a priori, que la constante R de la loi d'Ohm conserve la même valeur à toutes les tensions, surtout dans le cas de corps complexes comme le sont les diélectriques qui nous intéressent. Afin de nous donner une idée de l'importance des pertes par effet Joule, comparées aux pertes par hystérésis diélectrique aux tensions que nous avons adoptées, nous avons mesuré la résistance ohmique en courant continu et pour des tensions atteignant jusqu'à 17 500 volts.

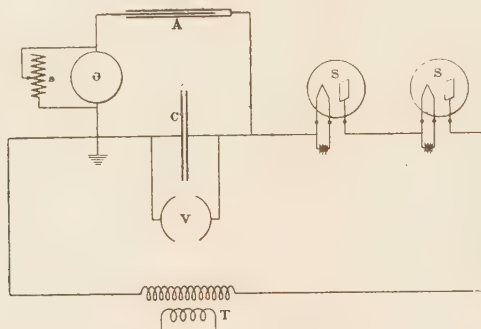


Figure 10. — Schéma du montage pour la résistance en haute tension courant continu. S, Redresseur thermoionique, pouvant supporter une tension de plus de 10 000 volts entre le filament et la plaque ; C, Condensateur de 0,029 μ F, pour une tension de 60 000 v ; E, Electromètre Abraham-Villard, de 40 000 v ; A, Epreuve ; G, Galvanomètre à cadre mobile, d'une sensibilité de 300 megohms ; s, Shunt ; T, Transformateur, 250 à 25 000 v.

» Nous nous sommes servi à cet effet du montage représenté par la figure 10.

» La tension aux bornes du condensateur est ici continue et égale à la tension maximum du courant sinusoïdal redressé. à condition que le circuit de l'éprouvette absorbe un courant négligeable devant le courant de charge du condensateur. Il nous a donc suffi de vérifier que la mise en circuit de l'éprouvette n'avait aucun effet sur la tension, pour être assuré que le courant mesuré par le galvanomètre était bien continu. Nous avons d'ailleurs fait cette vérification à différentes fréquences.

» Le tableau III donne quelques résultats obtenus. Il indique les valeurs de la résistance en fonction de la température et de la tension.

TABLEAU III

Eprouvette employée	Tension exprimée en volts	Température en degrés centigrades	Résistance d'un mètre de longueur d'éprouvette, en ohms	
N° 3	17 500	17	243	10 ⁹
	12 500	55	348	—
	15 000	55	324	—
	17 500	55	182	—
	7 500	95	76	—
	10 000	95	80	—
	12 500	95	81	—
	15 000	95	80	—
	17 500	95	78	—
N° 4	15 000	15	146	—
	15 000	25	146	—
	10 000	45	256	—
	15 000	45	119	—
	10 000	88	1,2	—
	15 000	88	1,4	—
N° 19	12 500	19	84	—
	15 000	19	55	—
	17 500	19	42	—
	12 500	52	59	—
	15 000	52	46	—
	17 500	52	34	—
	7 500	75	32	—
	10 000	75	29	—
	12 500	75	25	—
	15 000	75	23	—
	17 500	75	19	—
	7 500	95	3,3	—
	10 000	95	3,5	—
	12 500	95	3,6	—
	15 000	95	3,7	—
	17 500	95	3,7	—
	7 500	110	1,1	—
	10 000	110	1,4	—
	12 500	110	1,6	—
	15 000	110	1,6	—
	17 500	110	1,5	—

» On remarquera que la résistance diminue fortement lorsque la température augmente ; elle varie aussi avec la tension. Cette particularité, qui peut avoir une certaine importance en elle-même, n'a pas de conséquence appréciable dans notre cas ; la résistance reste tellement élevée à toutes températures et à toutes tensions, pour que les pertes en RI^2 soient négligeables, devant les pertes par hystérésis que l'on constate dans les mêmes conditions de température et de tension.

» On peut donc admettre sans crainte d'erreur que les pertes dont nous parlerons maintenant sont uniquement dues à un effet cyclique.

*
**

» INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — Nous avons fait plusieurs essais en fonction de la température, mais nous ne donnons ici

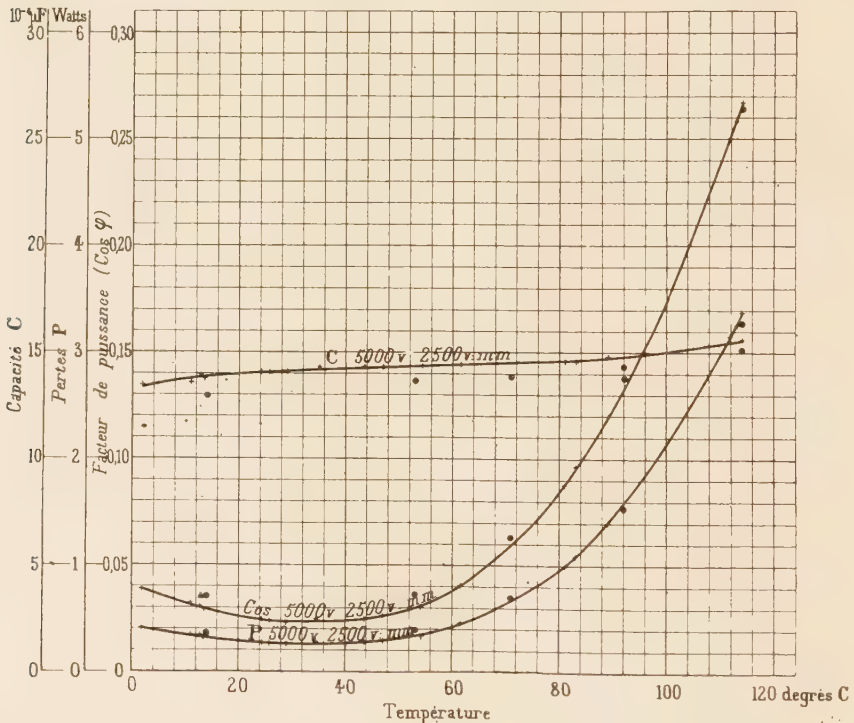


Figure 11. — Pertes, facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 1 en fonction de la température, pour un gradient de potentiel de 2 500 v/mm

que les résultats obtenus sur une éprouvette de chacun des quatre groupes.

» Les courbes de la figure 11 indiquent la variation des pertes,

de la capacité et du facteur de puissance relatifs à l'éprouvette N° 1, en fonction de la température, pour une tension de 5 000 volts et une fréquence de 50 périodes par seconde ⁽¹⁾. Nous opérons donc là dans les conditions de régime d'un câble électrique de fabrication normale et de mêmes dimensions que l'éprouvette.

» La partie de la courbe comprise entre 0° C et 16° C a été obtenue en introduisant un mélange réfrigérant dans l'étuve. Par crainte que l'humidité ne vienne affecter les résultats, nous avons entouré l'éprouvette d'un ruban huilé. Le raccord de cette partie de la courbe, avec la partie au-dessus de 15° C, relevée le lendemain, est suffisamment bon pour qu'il n'y ait rien à craindre à ce sujet.

» Des courbes donnant la température et les pertes en fonction du temps (semblables à celles de la figure 9) nous ont permis de suivre exactement la marche du phénomène et de rejeter quelques mesures, faites au moment d'un saut brusque de température et auxquelles on ne pouvait accorder grande confiance. Pour cette expérience, nous avons fait monter la température d'une façon presque continue et très lente; pour tous les autres essais de même nature, nous avons opéré par paliers de température prolongés, et obtenus par une montée rapide.

» Un nouveau cycle de température effectué le lendemain a donné les points que nous avons inclus dans des cercles. Le point dans un triangle a été relevé après une nouvelle journée de repos.

» L'influence de la température n'est pas très marquée jusque vers 60° C; mais à partir de ce point, les pertes augmentent très rapidement. On remarquera que les pertes d'énergie et le facteur de puissance passent par un minimum entre 30° C et 40° C. Ce phénomène, que nous avons constaté sur toutes nos éprouvettes, indique qu'il se produit probablement deux actions agissant en sens inverse.

» Nous avons calculé la capacité par la formule

$$C = \frac{I}{2 \pi f U}$$

dans laquelle I représente l'intensité du courant déwatté.

⁽¹⁾ A moins d'indication contraire, tous nos essais ont été faits à 50 périodes par seconde, les pertes sont exprimées en watts, et la capacité en dix-millième de microfarad par mètre de longueur de l'éprouvette.

» La courbe concernant la capacité présente cette particularité qu'elle semble être composée de trois parties distinctes : une courbe jusqu'à 25°C ; une droite jusqu'à 85°C et une nouvelle courbe assez accentuée. Cette augmentation continue peut provenir d'une modification de la constante diélectrique de la matière isolante, ou bien encore, de l'action mécanique dont nous avons parlé précédemment. Il est bon de noter cependant que toute augmentation de la capacité conduit à une diminution du facteur de puissance, à pertes d'énergie égales.

» Un tracé sur papier logarithmique des courbes des pertes et du facteur de puissance (fig. 12) nous a permis de nous rendre

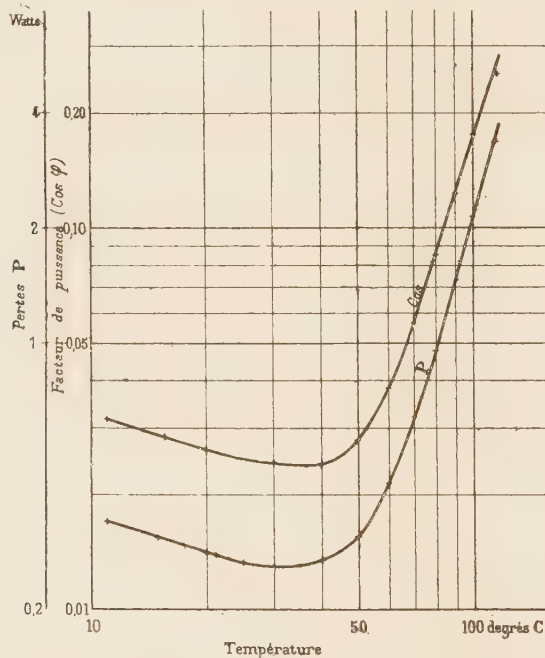


Figure 12. — Pertes et facteur de puissance de l'éprouvette N° 1 en fonction de la température. Coordonnées logarithmiques.

compte facilement qu'elles sont toutes deux composées approximativement, d'une exponentielle depuis 0°C jusqu'à 25°C , reliée par une courbe plus complexe à grand rayon de courbure, à une seconde exponentielle qui commence vers 70°C .

» L'inclinaison de ces courbes logarithmiques nous indique de plus, que les pertes et le facteur de puissance varient dans le rapport inverse de la puissance 0,3 de la température, dans l'intervalle de 0°C à 25°C , et qu'elles augmentent, à partir de 70°C

proportionnellement à la puissance 3,6 pour la puissance et 3,1 pour le facteur de puissance. Ceci peut s'exprimer par les formules suivantes :

» De 0° C à 25° C : $P = m T^{-0,3}$

$$\cos \phi = n T^{0,3}$$

» De 70° C à 110° C : $P = o T^{3,6}$

$$\cos \phi = p T^{3,1}$$

» Il ne faut pas se hâter d'en conclure que les pertes d'énergie

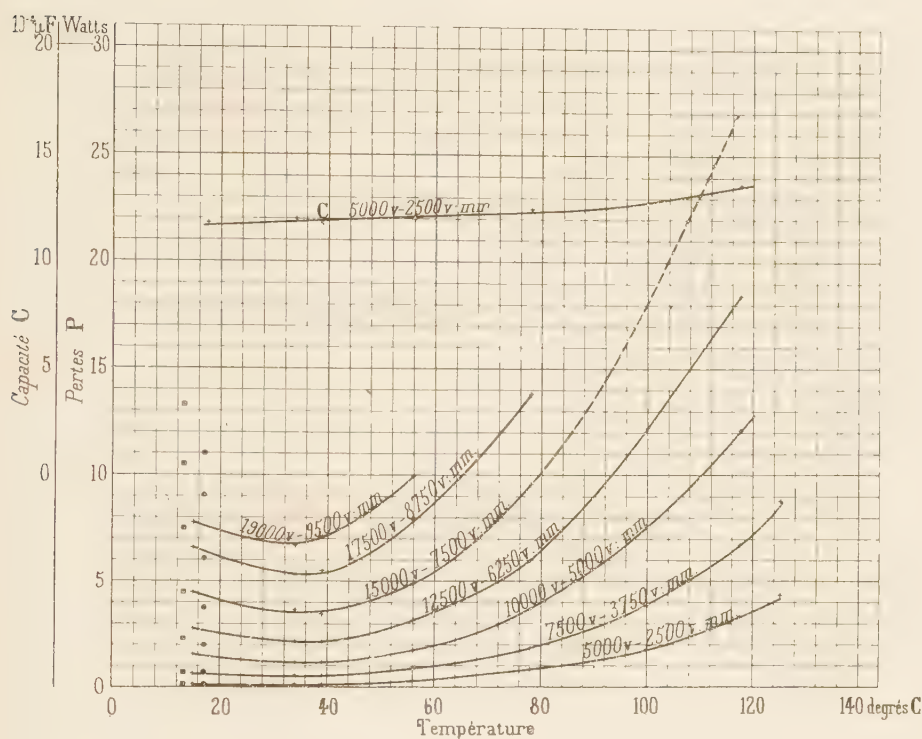


Figure 13. — Pertes de l'éprouvette N° 4 en fonction de la température et pour différents gradients de potentiel. Capacité de la même éprouvette en fonction de la température.

dans les diélectriques suivent toujours ces lois. Comme nous allons nous en rendre compte, les points d'inflexion et même les exposants peuvent varier suivant les échantillons. Nous pouvons dire, toutefois, que les résultats obtenus sur l'éprouvette dont il s'agit ici représentent une bonne moyenne.

TABLEAU IV

Tension en volts	Gradient de potentiel en volts par millimètre	Pertes en watts par mètre de longueur d'éprouvette	Capacité par mètre de longueur d'éprouvette en μ F	Facteur de puissance exprimé en centièmes	Température en degrés centigrades
5 000	2 500	0,170	11,6 10^{-4}	1,85	15°
7 500	3 750	0,650	11,4	3,21	
10 000	5 000	1,52	11,8	4,10	
12 500	6 250	2,79	12,1	4,69	
15 000	7 500	4,49	12,5	5,07	
17 500	7 750	6,50	12,5	5,38	
19 000	9 500	7,70	12,6	5,43	34°
5 000	2 500	0,156	11,9	1,66	
7 500	3 750	0,530	11,7	2,55	
10 000	5 000	1,18	11,8	3,18	
12 500	6 250	2,16	12,0	3,67	
15 000	7 500	3,61	12,5	4,08	
17 500	7 750	5,30	12,5	4,37	39°
19 000	9 500	6,50	12,7	4,64	
5 000	2 500	0,164	11,9	1,75	
7 500	3 750	0,525	11,6	2,55	
10 000	5 000	1,21	11,8	3,27	
12 500	6 250	2,14	11,9	3,65	
15 000	7 500	3,43	12,3	4,01	56°
17 500	7 750	5,50	12,5	4,48	
19 000	9 500	7,10	12,7	4,96	
5 000	2 500	0,340	12,2	3,55	
7 500	3 750	0,850	11,8	4,08	
10 000	5 000	1,74	12,0	4,60	
12 500	6 250	3,07	11,1	5,15	78°
15 000	7 500	4,90	12,4	5,55	
17 500	7 750	7,81	12,7	6,41	
19 000	9 500	9,92	12,8	6,81	
5 000	2 500	0,815	12,5	8,25	
7 500	3 750	1,83	12,1	8,55	
10 000	5 000	3,70	12,5	9,43	100°
12 500	6 250	6,00	12,4	9,79	
15 000	7 500	9,55	12,9	10,4	
17 500	7 750	13,3	13,1	10,9	
5 000	2 500	1,79	12,8	17,6	
7 500	3 750	3,88	12,2	17,7	
10 000	5 000	7,55	12,8	18,4	118°
12 500	6 250	12,2	13,4	18,2	
5 000	2 500	3,30	13,6	29,5	
7 500	3 750	6,71	13,2	27,7	
10 000	5 000	12,1	14,0	26,8	
12 500	6 250	18,4	14,5	25,0	
5 000	2 500	4,33	14,6	36,0	125° ⁽¹⁾
7 500	3 750	8,80	14,1	33,8	
10 000	5 000	15,4	14,5	31,9	

(¹) Les 3 dernières lignes de ce tableau sont relatives à des essais faits après un deuxième cycle de température.

» Le tableau IV et les courbes des figures 13 et 14 résument les mesures faites sur l'éprouvette N° 4. On y voit les courbes correspondant aux différentes tensions, excepté celle qui donnerait la variation de la capacité, laquelle n'est pas beaucoup affectée par la tension.

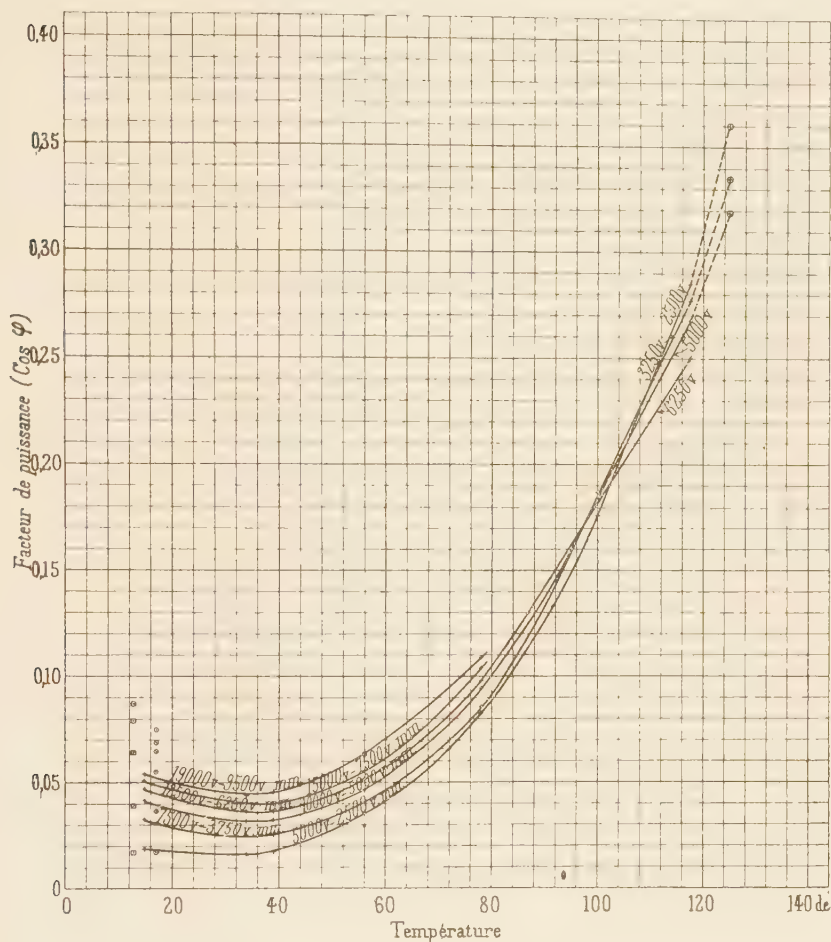


Figure 14. — Facteur de puissance de l'éprouvette N° 4 en fonction de la température, pour différents gradients de potentiel.

» Il est très intéressant de constater que les courbes ont une allure à peu près identique à celles de l'éprouvette précédente à partir de 70° C. On trouve pour les formules précédentes pour T un exposant 3,4 pour les pertes et 3,0 pour le facteur de puissance.

» Le point d'inflexion, sur l'échelle des températures, est cependant le plus bas que nous ayons constaté.

» Les points entourés d'un cercle ont été relevés le lendemain ; ceux inclus dans des triangles, trois jours plus tard, après que l'éprouvette eut été portée trois fois à la température de 120° C.

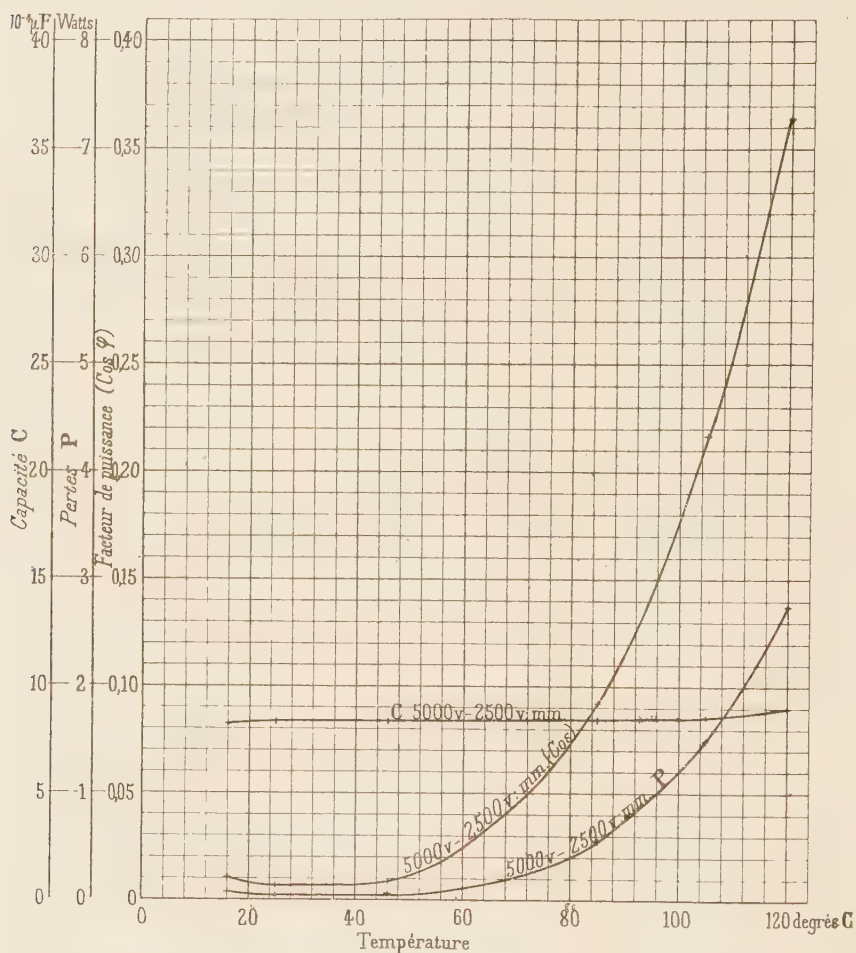


Figure 15. — Pertes, facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 17 en fonction de la température, pour un gradient de potentiel de 2 500 v:mm.

» Une particularité intéressante des courbes concernant le facteur de puissance, est l'inversion de leur position relative aux températures élevées. Nous avons constaté ce phénomène sur plus de la moitié des éprouvettes que nous avons essayées, nous aurons l'occasion d'y revenir plus loin.

» Les échantillons des séries C et D ont donné des pertes qui

sont plus faibles aux basses températures, mais qui, par contre, augmentent plus rapidement aux températures élevées.

» Par exemple, pour l'éprouvette N° 17 (résultats représentés par la figure 15) nous trouvons un exposant pour T égal à 4,6 pour les pertes à partir de 70° C et à 3,9 pour le facteur de puissance.

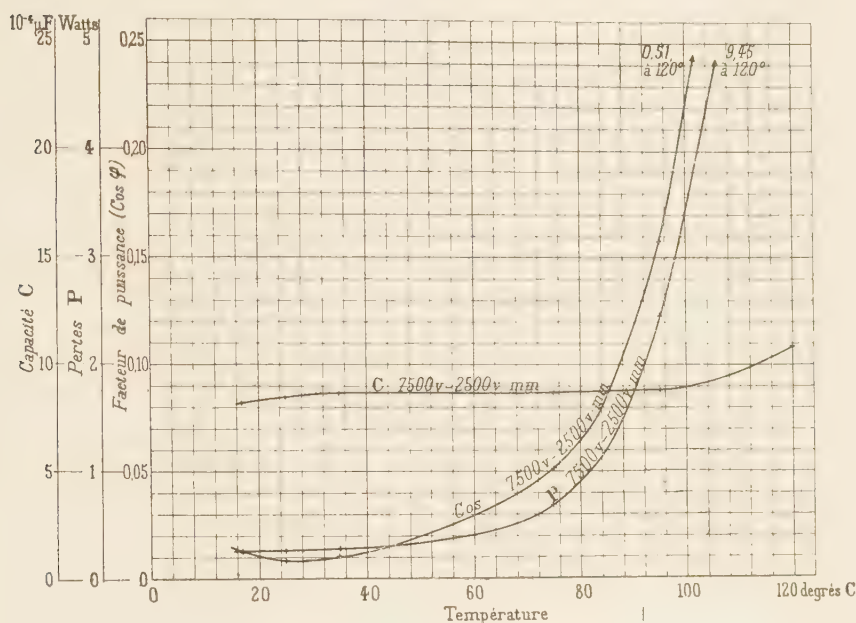


Figure 16. — Pertes, facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 21 en fonction de la température, pour un gradient de potentiel de 2 500 v:mm.

» L'éprouvette N° 21 a donné des résultats encore plus accentués (fig. 16). Nous ferons remarquer que cette éprouvette n'avait que 10 couches de papier pour une épaisseur de 3 mm. Elle avait donc moins de consistance que les autres et, par conséquent, elle se prêtait mieux au déplacement des divers éléments de la masse du diélectrique.

» INFLUENCE DE LA TENSION. — Si nous représentons en fonction de la tension les valeurs indiquées au tableau IV, on trouve les courbes représentées dans les figures 17, 18, 19.

» Les pertes augmentent rapidement avec la tension. Comme nous pouvons le constater sur le tracé à échelle logarithmique

de la figure 20, les courbes ne sont pas des exponentielles parfaites, mais elles s'en approchent beaucoup, surtout à partir de 7 500

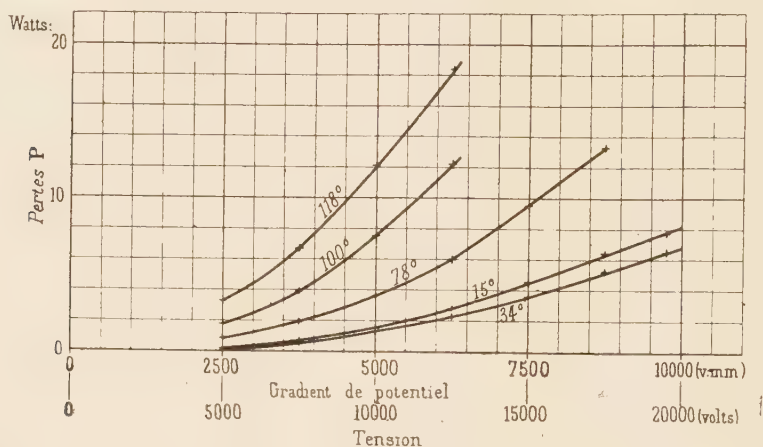


Figure 17. — Pertes de l'éprouvette N° 4 en fonction de la tension, à différentes températures.

volts environ. On trouve, en gros, que les pertes peuvent être représentées par la formule :

$$W = m U^n$$

dans laquelle on donnera à l'indice n les valeurs suivantes pour les différentes températures :

2,7	pour 15° C
2,6	— 34° C et 39° C
2,5	— 56° C
2,3	— 78° C
2,2	— 100° C
1,9	— 118° C

» On suppose, d'habitude, les pertes par hystérésis diélectrique, proportionnelles au carré de la tension. On voit que cette supposition n'est pas très exacte, tout au moins pour les matières que nous avons étudiées, et que, de plus, la température intervient pour une large part dans l'expression de ces pertes. Nous trouverons plus loin d'autres causes qui peuvent affecter la valeur de l'exposant.

» Nous retrouvons ici (fig. 18), au sujet du facteur de puissance, l'influence de la tension aux différentes températures, sur

laquelle nous avons déjà attiré l'attention. Cette inversion de la pente, lorsque l'on passe de 100°C à 120°C , est assez curieuse. Elle

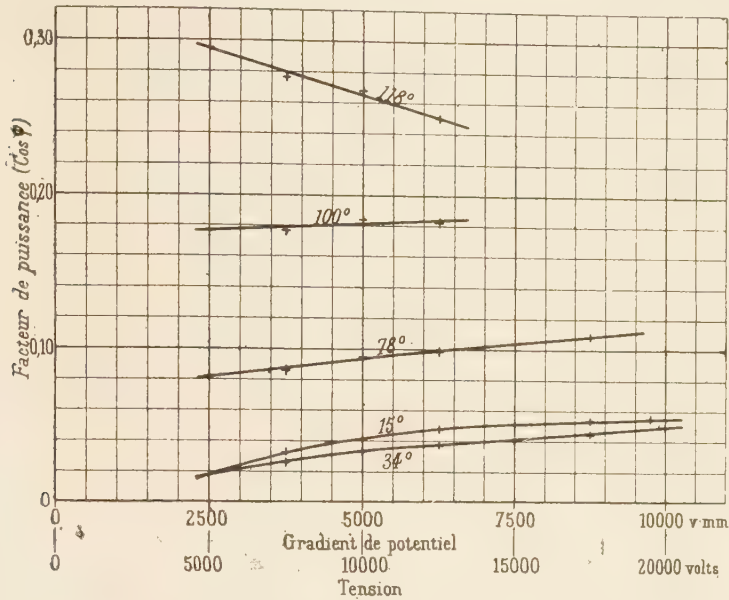


Figure 18. — Facteur de puissance de l'éprouvette N° 4 en fonction de la tension, à différentes températures.

n'est pas générale, mais nous l'avons constaté sur plusieurs

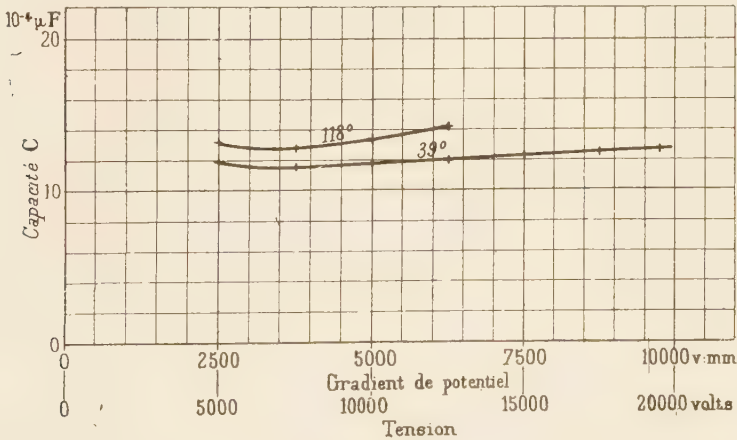


Figure 19. — Capacité de l'éprouvette N° 4 en fonction de la tension, à 39°C et à 118°C .

éprouvettes. Dans certains cas, l'inclinaison reste dans le même sens à toutes les températures, dans d'autres cas, la courbe pré-

sente un minimum. Il ne s'agit pas d'un phénomène passager, car pour une éprouvette donnée, il se reproduit identiquement lorsque l'on répète l'expérience.

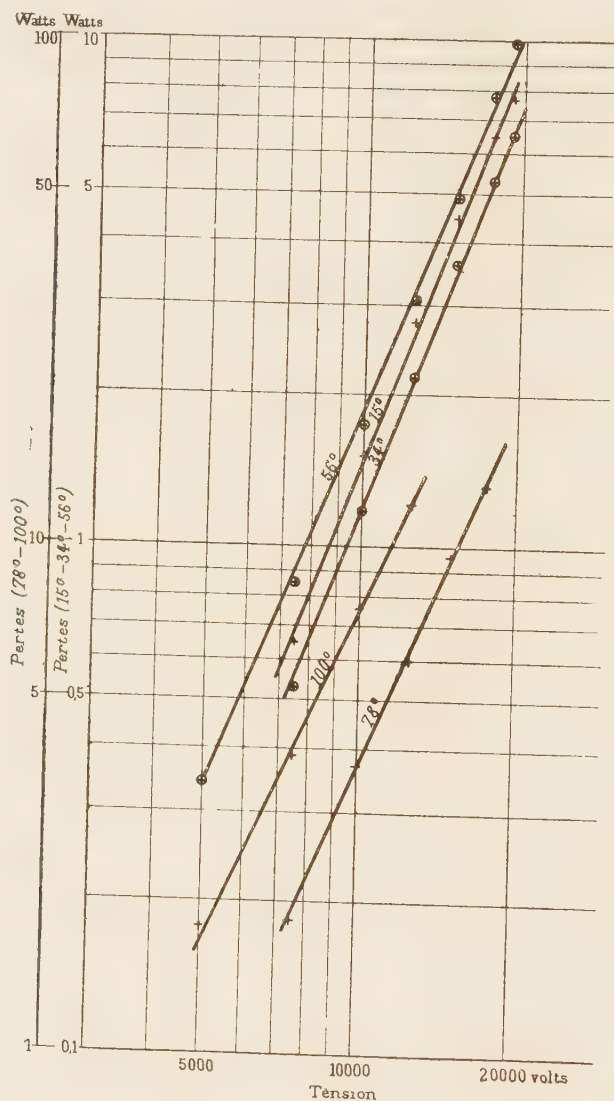


Figure 20. — Pertes de l'éprouvette N° 4 en fonction de la tension à différentes températures. Coordonnées logarithmiques.

» La capacité diminue d'abord puis augmente avec la tension (fig. 19). La différence entre les valeurs extrêmes n'est cependant pas très grande

» Les figures 21, 22, 23 et 24 donnent les résultats obtenus sur les

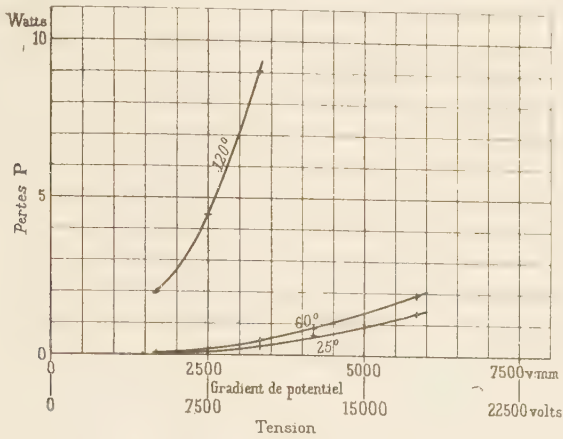


Figure 21. — Pertes de l'éprouvette N° 19 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes températures.

éprouvettes N° 19 et N° 21. Ces éprouvettes étaient constituées

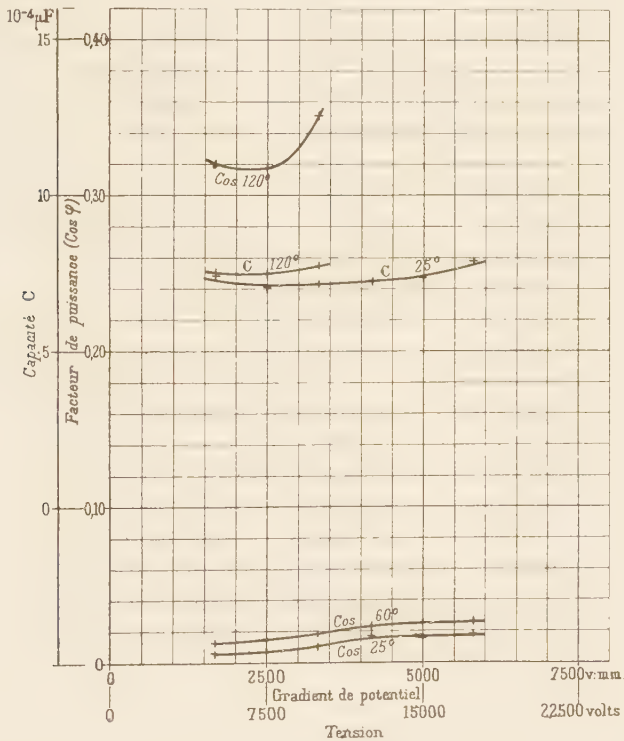


Figure 22. — Facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 19 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes températures.

d'un nombre de couches de papier relativement plus faible que

l'éprouvette N° 4, la matière d'imprégnation contenait beaucoup plus de résine et l'épaisseur du diélectrique était de 3 mm au lieu de 2 mm. Il ne faut pas s'étonner si les résultats sont un peu différents en valeur absolue.

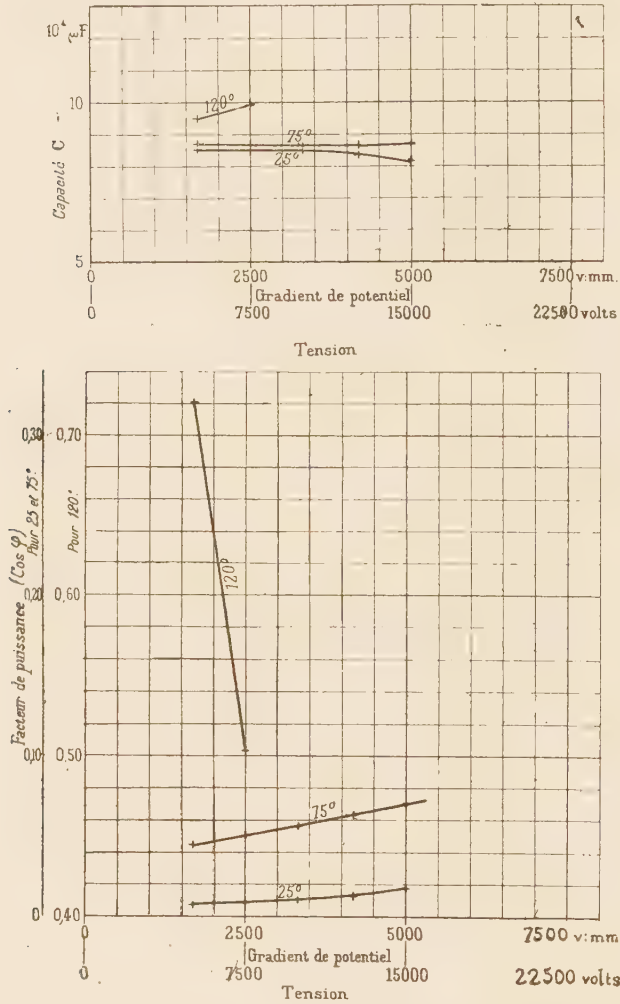


Figure 23. — Facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 21 en fonction du gradient de potentiel pour différentes températures.

» Les pertes dans ces éprouvettes, si différentes en somme de celles dans la précédente, sont cependant représentées par des courbes qui ont presque exactement la même forme. On trouve, en effet, que pour le N° 19, les pertes à 70° C augmentent proportionnellement à la puissance 2,6 de la tension, et pour le N° 21 elles augmentent suivant la puissance 2,4.

» Jusqu'à présent nous n'avons considéré que des épaisseurs constantes de diélectriques. On peut aussi faire varier le gradient

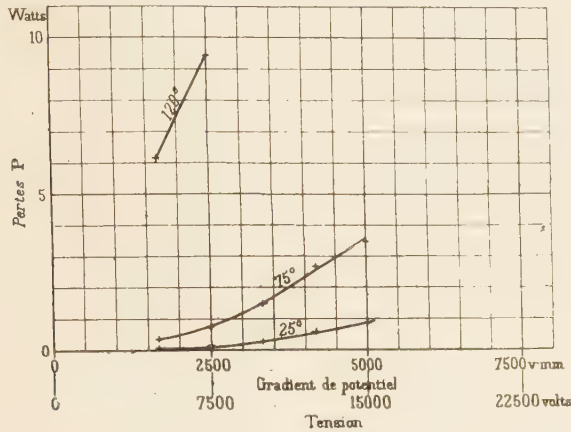


Figure 24. — Pertes de l'éprouvette N° 21 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes températures.

de potentiel en modifiant l'épaisseur. Nous avons fait un certain nombre d'essais sur des éprouvettes auxquelles nous enlevons suc-

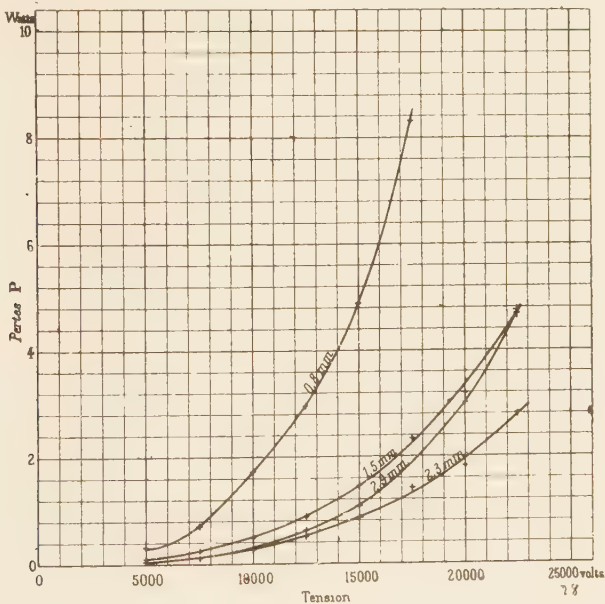


Figure 25. — Pertes de l'éprouvette N° 10 en fonction de la tension, pour différentes épaisseurs.

cessivement des couches de papier. Nous retrouvons toujours les mêmes allures de courbes, en fonction du gradient de potentiel et de la tension.

» Ces dernières courbes, de même que toutes celles qui suivent, ont été relevées à une température constante prise entre 35°C

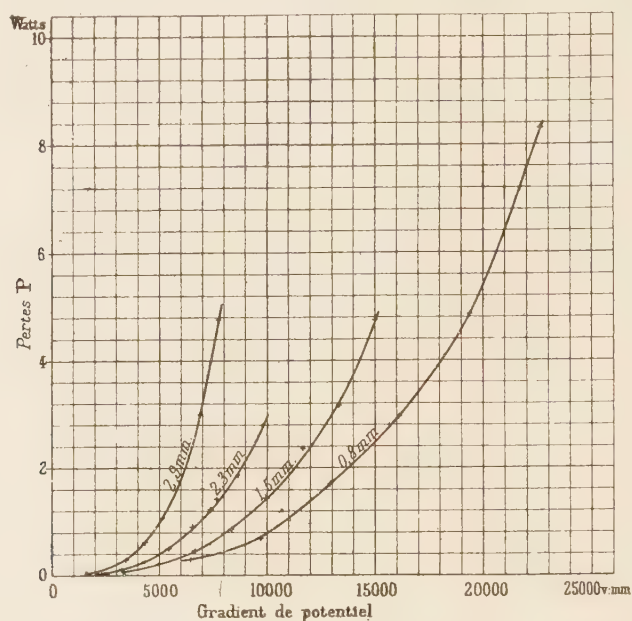


Figure 26. — Pertes de l'éprouvette N° 10 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes épaisseurs.

et 40°C, afin de diminuer l'erreur due à une légère variation de température qui pourrait se produire. Cette précaution est im-

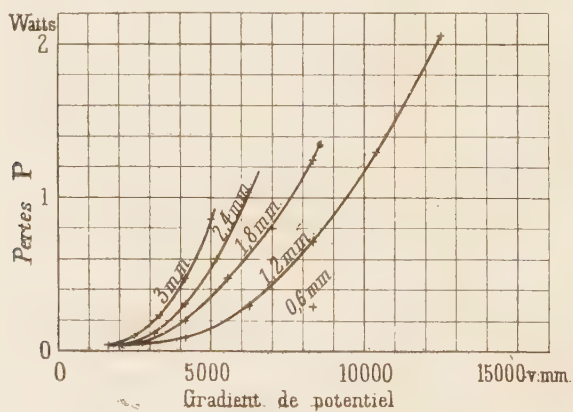


Figure 27. — Pertes de l'éprouvette N° 20 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes épaisseurs.

portante, surtout dans le cas des essais en fonction de la fréquence, ceux-ci prenant beaucoup de temps.

» Les résultats obtenus pour l'éprouvette N° 10 sont indiqués

par les courbes des figures 25 et 26 ; ceux de l'éprouvette N° 20 sont montrés sur la figure 27.

**

» INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR. — Reprenons les valeurs de la courbe des pertes en fonction du gradient de potentiel pour l'éprouvette N° 10 (figure 26). Ces valeurs étudiées en fonction de l'épaisseur donnent les courbes de la figure 28. Nous voyons donc

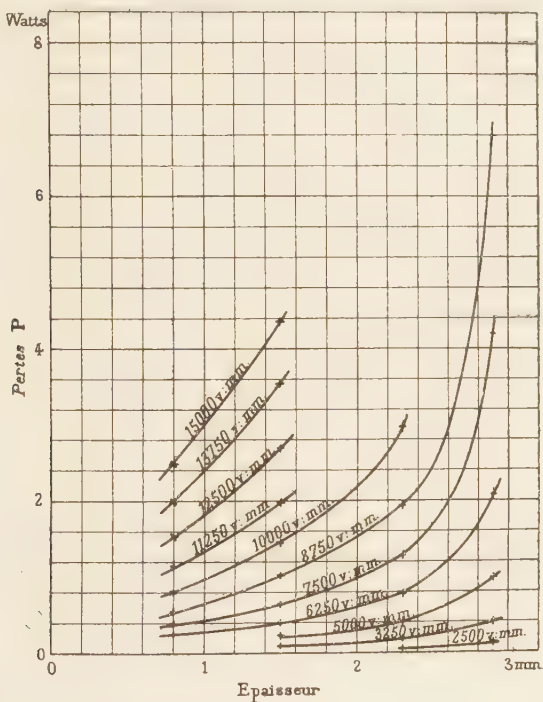


Figure 28. — Pertes de l'éprouvette N° 10 en fonction de l'épaisseur, pour différents gradients de potentiel.

que les pertes augmentent avec l'épaisseur pour un gradient de potentiel donné, sans toutefois être proportionnelles au volume, et que, à partir d'une certaine épaisseur, cette augmentation est considérable.

» Puisque d'une part, pour une épaisseur donnée, les pertes augmentent avec le gradient de potentiel et que, d'autre part, pour un gradient fixe ces pertes diminuent avec l'épaisseur, nous pouvons supposer qu'il existe, pour une tension donnée, une épaisseur pour laquelle les pertes sont minimum. C'est ce que nous avons

constaté sur l'éprouvette N° 10 (fig. 29). Remarquons que les courbes aux différentes tensions ont leurs minima sur la verticale qui correspond à une épaisseur d'environ 2,0 mm. En d'autres termes, pour un diélectrique donné, il existe une épaisseur pour laquelle les pertes sont minima pour toutes les tensions. Ceci peut avoir une conséquence pratique importante.

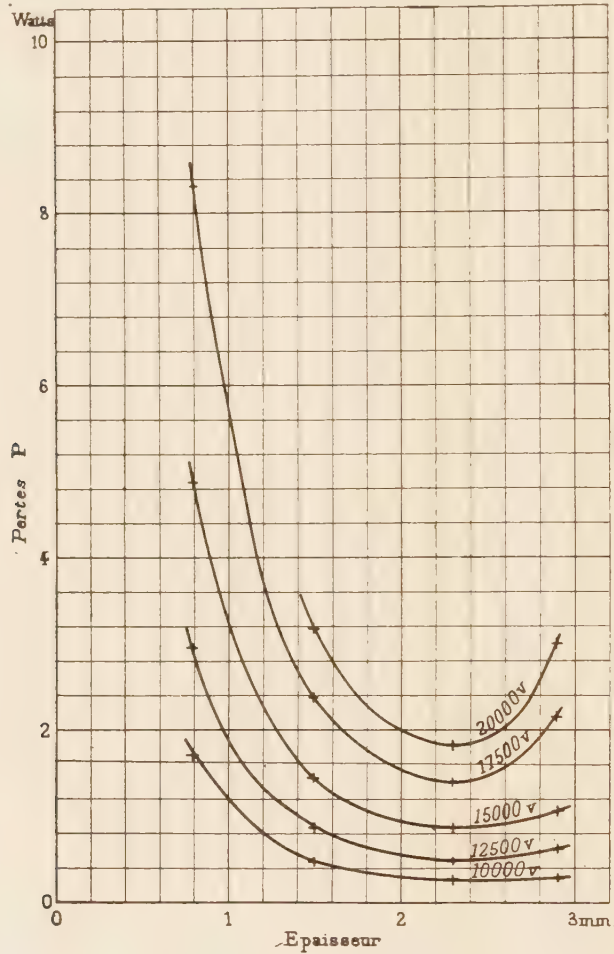


Figure 29. — Pertes de l'éprouvette N° 10 en fonction de l'épaisseur, pour différentes tensions.

» Le facteur de puissance suit les variations des pertes (fig. 30). La capacité ne présentant rien d'anormal, nous nous sommes abstenu d'en donner les courbes.

» Les pertes dans les échantillons des séries C et D étant plus faibles, le point optimum que nous venons de constater n'ap-

paraît pas dans la limite de nos mesures sur l'échantillon N° 20 (fig. 31 et 32).

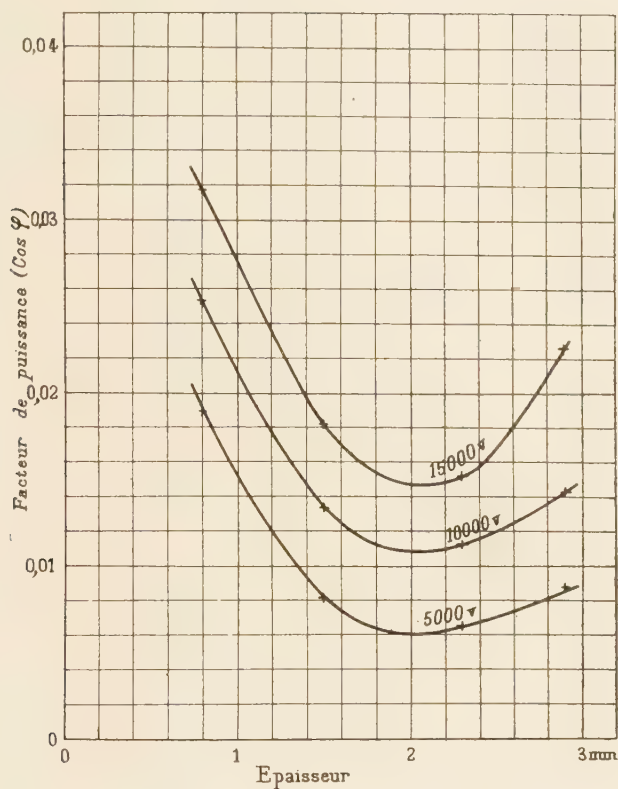


Figure 30. — Facteur de puissance de l'éprouvette N° 10 en fonction de l'épaisseur, pour différentes tensions.

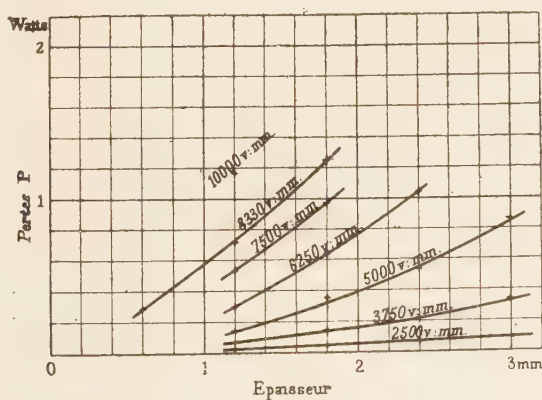


Figure 31. — Pertes de l'éprouvette N° 20 en fonction de l'épaisseur, pour différents gradients de potentiel.

» INFLUENCE DU RAYON DE COURBURE. — On sait que le gradient de potentiel n'est pas uniforme dans la masse d'un condensateur cylindrique, mais qu'il est plus élevé au centre qu'à la périphérie et qu'il se distribue différemment suivant l'importance du rayon

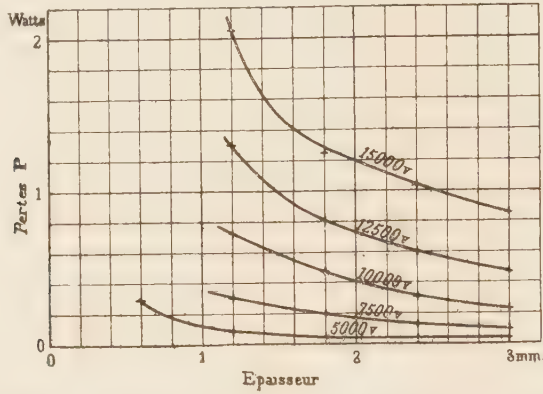


Figure 32. — Pertes de l'éprouvette N° 20 en fonction de l'épaisseur, pour différentes tensions.

de courbure (62), Cette distribution étant représentée par la formule :

$$\frac{dU}{d\rho} = \frac{U}{\rho \log_e \frac{r}{R}}$$

dans laquelle $\frac{dU}{d\rho}$ représente le gradient de potentiel à l'extrémité du rayon ρ ; r , le rayon de la surface interne, et R , le rayon de la surface externe du cylindre.

» Le gradient de potentiel augmente lorsque ρ diminue et, pour une épaisseur donnée, il tend vers une valeur constante lorsque r augmente,

» Nous avons voulu vérifier l'influence que cette particularité pouvait avoir sur des éprouvettes de différents rayons. Les résultats sont donnés par les courbes de la figure 33. Ils se rapportent à la moyenne d'au moins deux éprouvettes pour chaque diamètre. Toutes avaient 3 mm d'épaisseur. Les pertes sont exprimées en watts par décimètre carré de surface moyenne du diélectrique.

» On remarquera que les pertes diminuent d'abord avec le diamètre et qu'elles augmentent ensuite. Il se produit un minimum pour un diamètre d'environ 15 mm. Nous avons indiqué en

pointillé la courbe pour les éprouvettes de 40 mm, car cette courbe comporte une erreur due aux effluves, plus grande que pour les autres diamètres. Evidemment, cela n'explique qu'en partie la forte augmentation des pertes à partir de 20 mm.

» La marche générale du phénomène pourrait peut-être s'expliquer de la manière suivante. Pour les petits diamètres, la chaleur produite est localisée, en grande partie, près de la surface interne et une augmentation du diamètre facilite le rayonnement tout en diminuant l'importance du gradient de potentiel en ce point. A partir d'un certain moment, le gradient de poten-

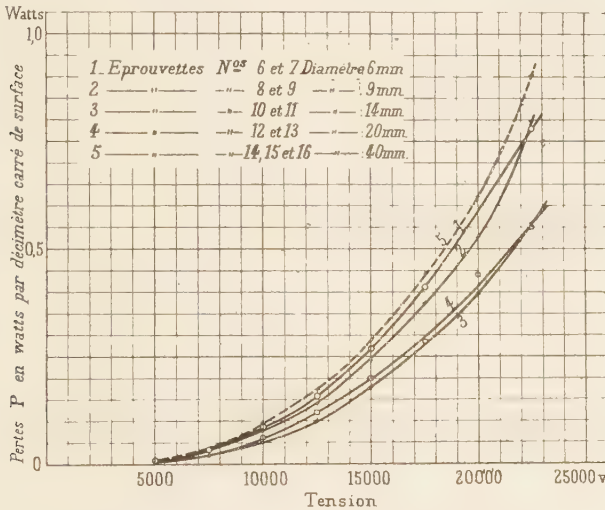


Figure 33. — Pertes en fonction de la tension, d'éprouvettes de différents diamètres.

tiel se distribuant plus uniformément, la chaleur produite au centre de la masse devient relativement plus importante, la chaleur se dégage moins facilement, d'où augmentation de la température et des pertes. Evidemment, les choses se passeraient différemment, si le centre de l'éprouvette était constitué par un corps dont la température serait plus élevée : un conducteur traversé par un courant, par exemple. Il y aurait peut-être lieu aussi d'attribuer une partie du phénomène au fait que les éprouvettes de 6, 9 et 14 mm de diamètre étaient enroulées sur un cylindre en bois, tandis que celles de 20 et 40 mm étaient sur tubes en carton. Ceci ne doit cependant donner qu'une faible importance et ne pas modifier l'allure générale du phénomène.

» INFLUENCE DE LA FRÉQUENCE. — Nous avons étudié sur quelques éprouvettes, l'effet d'une variation de la fréquence, entre 20 et 60 périodes par seconde. Les courbes des figures 34 et 35 indiquent les résultats obtenus sur l'éprouvette N° 5.

» A la tension de 15 000 volts, les pertes sont rigoureusement proportionnelles à la fréquence ; elles augmentent un peu moins

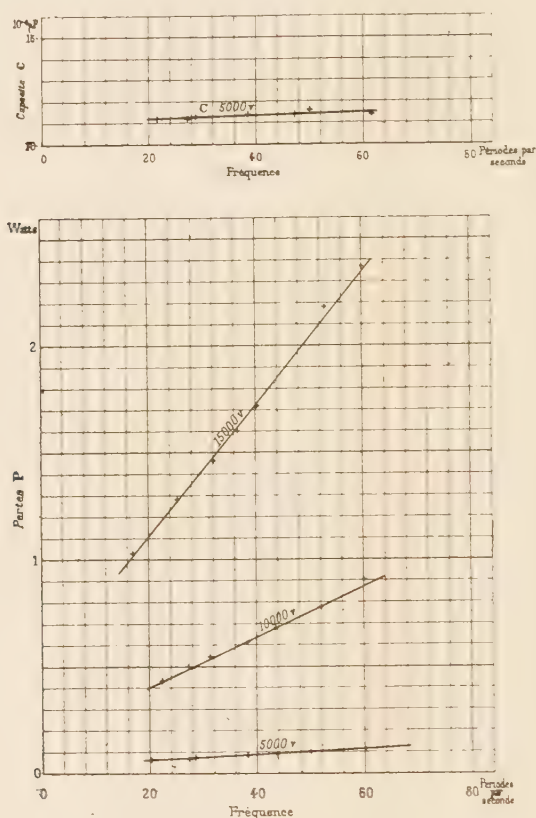


Figure 34. — Pertes et capacité de l'éprouvette N° 5 en fonction de la fréquence, pour différentes tensions.

pour les tensions de 5 000 volts et de 10 000 volts ; à 15 000 volts, la capacité est constante pour toutes les fréquences ; à 5 000 et 10 000 volts, elle augmente légèrement. Le facteur de puissance suit naturellement une courbe qui résulte de ces deux actions.

» Dans l'ensemble, nous pouvons dire que nos essais nous ont montré que, pour des fréquences de 20 à 60 périodes par seconde,

les pertes augmentent légèrement moins qu'en proportion directe de la fréquence.

» Notons enfin que si les pertes dans les diélectriques doivent être attribuées en grande partie à une viscosité, elles devraient augmenter avec la fréquence ; mais nos essais ont été effectués

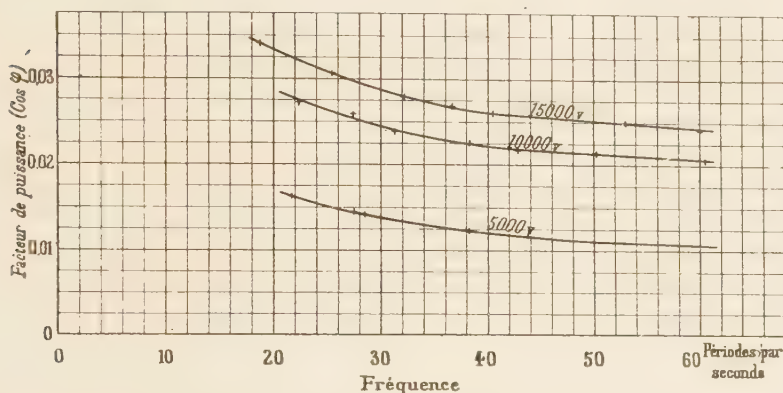


Figure 35. — Facteur de puissance de l'éprouvette N° 5 en fonction de la fréquence, pour différentes tensions.

entre des limites de fréquence trop restreintes pour que nous puissions nous prononcer.

*
**

» CONCLUSION. — Les conclusions à tirer de nos recherches sur un diélectrique composé de papier imprégné d'un mélange comprenant surtout de la résine et de la vaseline, peuvent être résumées comme suit :

» 1°) L'électrodynamomètre à miroir, d'une sensibilité de l'ordre de 10^{-8} R watts par millimètre (R , résistance du circuit en dérivation), se prête très bien à la mesure directe des pertes d'énergie dans les diélectriques, par l'utilisation d'une simple résistance dans le circuit en dérivation. Cette méthode exige cependant que toutes les précautions indiquées dans cette étude soient prises et que le bon fonctionnement du montage soit vérifié, expérimentalement, avec grand soin.

» 2°) Les pertes par effluves n'ont pas d'importance appréciable, même à 25 000 v, à condition d'utiliser une éprouvette de forme cylindrique allongée.

» 3°) Les pertes ne sont pas rigoureusement constantes par

rapport au temps. Il n'est pas rare de trouver des différences de plus de 10 pour 100 pour des mesures identiques effectuées à différents moments.

» 4°) Les pertes par effet Joule sont négligeables devant les pertes par hystérésis, à toutes les températures et pour toutes les tensions comprises respectivement entre 0° C à 125° C et 5 000 v à 25 000 v.

» 5°) En fonction de la température, les pertes peuvent s'exprimer par une formule de la forme :

$$P = m T^n$$

dans certaines limites de température et pour un gradient de potentiel assez élevé. Dans le cas du diélectrique utilisé d'habitude pour les câbles électriques de basse tension (5 000 à 10 000 v), cette expression devient :

» De 0° C à 25° C : $P = a T^{-0,3}$

» De 70° C à 125° C : $P = b T^{3,6}$

» 6°) En fonction de la tension, on peut utiliser la formule :

$$P = m U^n$$

Dans le même cas que précédemment, on obtient, pour des gradients de potentiel supérieurs à 3 500 v:mm et à la température de 56° C :

$$P = c U^{2,5}$$

L'exposant varie de 2,7 à 1,9 lorsque la température passe de 15° C à 120° C.

» 7°) Pour fixer les idées, on peut dire que les pertes à 40° C et pour un gradient de potentiel de 2 500 v:mm sont (toujours pour le même cas particulier) d'environ 0,2 watts par mètre de longueur, pour une éprouvette de 20 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur.

» 8°) La capacité est peu modifiée par les variations de la température et par celles de la tension.

» 9°) Le facteur de puissance, pour un gradient de potentiel de 2 500 v:mm varie de 0,015 à 0,25 pour un écart de température de 35° à 110° C.

» 10°) Lorsque l'épaisseur du diélectrique diminue, les pertes augmentent si la tension reste constante ; elles diminuent si le

gradient de potentiel reste constant. Il existe donc une épaisseur optimum pour laquelle les pertes sont minima pour toutes les tensions.

» 11°) Lorsque le rayon de courbure de l'éprouvette augmente, les pertes diminuent tout d'abord, puis elles augmentent pour atteindre un maximum lorsque le rayon devient suffisamment grand, probablement.

» 12°) Les pertes augmentent presque proportionnellement à la fréquence. »

*
**

En terminant, nous voulons remercier M. le professeur Paul Janet, pour ses sages conseils, et MM. les chefs de Travaux du Laboratoire central d'Electricité qui, mis au courant du peu de temps dont nous disposions pour faire notre étude, ont fait tout ce qui était en leur pouvoir pour nous faciliter notre travail. Nous tenons à remercier tout particulièrement M. Paul de la Gorce pour l'intérêt qu'il n'a cessé de porter à nos recherches et pour l'aide efficace qu'il nous a prêtée en maintes occasions.

BIBLIOGRAPHIE^{*}

- 1) 1861 SIEMENS, W. (VON). De l'échauffement du verre des bouteilles de Leyde. *Monatsberitch Berliner Akad.*, oct. 1861; *Kon. Preuss. Akademie zu Berlin*, Berichte, 1864.
- 2) 1873 MAXWELL. « Electricité et magnétisme ». Théorie des résidus.
- 3) 1878 AYRTON et PERRY. On the viscosity of dielectrics. *Proceedings of the Royal Society*, 1878, vol. 27, p. 238.
- 4) 1882 NACCARI et BELLATI. *Atti di Torino*, 1882, t. VII ; *Journal de Physique*, 1882, 2^e série, t. I. Trouvent que l'échauffement du diélectrique est proportionnel au carré de l'intensité du champ.
- 5) 1891 CRADEW, P. Energy loss in condensers. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1891, vol. 20, p. 447.
- 6) 1892 STEINMETZ, C.-P. Dielectric hysteresis. *Electrical Engineer*, 1892, p. 272 ; *Lumière Electrique*, avril 1892, t. XLIV. — A la suite d'expériences sur un condensateur en papier paraffiné, signale l'analogie du phénomène avec celui d'hystérésis magnétique. Trouve que les pertes sont proportionnelles au carré de l'intensité du champ.
- 7) 1892 ARNO, R. Rotating field and electric hysteresis. *Electrician*, 1892-93, p. 516; 1893, p. 201; 1893-94, p. 22 ; *Atti delle R. Accademia dei Lincei*, 1892, vol. 1, p. 284. — Expérimente au moyen d'un cylindre diélectrique suspendu dans un champ tournant. Trouve que les pertes sont proportionnelles à la puissance 1,6 du champ.
- 8) 1893 JANET, P. Hystérésis et viscosité diélectrique du mica pour des oscillations rapides. *Journal de Physique*, 1893, 3^e série, t. II ; *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1893, t. CXVI, p. 373. — Etablit expérimentalement courbe d'hystérésis diélectrique.
- 9) 1893 BOREL, C. Phénomènes dynamiques à l'électrisation résiduelle des diélectriques. *Arch. Genève*, 1893, t. XXX ; *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1893, t. CXVI, p. 1192. — Expérimente sur disque en papier paraffiné suspendu dans un champ périodique, en présence d'un diélectrique à résidu. Attribue pertes à un phénomène de conduction interne ou externe. Les bons conducteurs comme les bons diélectriques sont sans effets.
- 10) 1893 FRITZ, H. Über warmetonung bei electrischer des polarisations des glasses. *Thèse, Zurich*, 1893. Mesure au calorimètre. — Constate que l'échauffement est proportionnel au carré de l'intensité du champ électrique.

- 11) 1893 BEDELL, BALLYNTINE et WILLIAMSON. Alternate current and dielectric hysteresis. *Phys. Review*, sept.-oct. 1893, vol. 1, N° 2. — Etudient condensateur en papier enduit de cire. Etablissent des cycles des charges en fonction de la différence de potentiel.
- 12) 1895 PORTER et MORRIS. Dissipation of energy in dielectrics. *Proceedings of the Royal Soc.*, 1893, vol. 54, p. 7 ; 1895, vol. 57, p. 469 ; *Journal de Physique*, 1896, 3^e série, t. V. — Etudient au balistique un condensateur en papier paraffiné. Trouvent qu'il n'y a pas d'hystérésis de champ électrique.
- 13) 1895 GASNIER, P. Energy losses in dielectrics. *Electrician*, 1895, vol. 36, p. 7.
- 14) 1895 EISLER, H. Hystérésis diélectrique. *Eclairage électrique*, août 1895, t. IV. — Montre que les pertes sont proportionnelles au carré de la différence de potentiel et qu'elles tendent vers 0 pour une périodicité nulle ou infinie.
- 15) 1895 HESS, A. *Journal de Physique*, 1895, 3^e série, t. II ; *Eclairage électrique*, 1895, t. III. — Emet théorie déduite de la théorie des résidus de Maxwell.
- 16) 1895 PELLAT, H. Mesure de la force agissant sur un diélectrique non électrisé, placé dans un champ électrique; *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1895, vol. 121, p. 938. — Expérimente sur lame diélectrique suspendue entre deux armatures, par une méthode de pesée. Vérifie la loi de la proportionnalité au carré de la tension.
- 17) 1895 DUGGELIN. *Vierteljahrschrift, Zurich*, 1895, t. XXXIX. — Etudie un grand nombre de diélectriques par l'intermédiaire de leur élévation de température. Trouve un rapport simple entre l'échauffement et la différence de potentiel.
- 18) 1896 GOUY, A. Sur le rôle des milieux diélectriques en électrostatique. *Journal de Physique*, 1896, 3^e série, t. VI, p. 154. — Etude théorique.
- 19) 1897 HOULLEVIGUE, L. Sur le résidu des condensateurs. *Ann. Université de Lyon*, 1897, t. XXXII ; *Journal de Physique*, 1897, 3^e série, t. VI, p. 113. — Théorie sur les charges résiduelles. Décompose le déplacement électrique de Maxwell en deux phases: un déplacement instantané de l'éther, suivi d'un déplacement graduel moléculaire sous la tension exercée par le premier.
- 20) 1897 SCHAUFELBERGER. Ueber hysteresis in dielectricischen. *Zurich 1897. Journal de Physique*, 1898, 3^e série, t. VII. — Vérifie la loi de la proportionnalité des pertes au carré de la tension, au moyen d'échantillons oscillant entre des armatures.
- 21) 1898 QUINCKE, G. Viscosity in an electric field. *Annalen der Physik und Chemie*, 1897, vol. 62 ; *Science abstracts*, 1898, vol. 1, N° 106.
- 22) 1898 HANAUER, J. Influence of frequency on capacity. *Science abstracts*, 1898, vol. 1, N° 1350 ; *Ann. der Physik und Chemie*, 1898, vol. 65, p. 789. — Mesures par méthode de pont.
- 23) 1899 PELLAT, H. Polarisation réelle des diélectriques, conséquences de cette polarisation. *Annales de Chimie*, 1899, vol. 2, p. 150 et 571.

- 24) 1899 ROSA et SMITH. Condensers losses. *Physical Review*, 1899, vol. 8, p. 1. — Etudient le rendement d'un condensateur au calorimètre.
- 25) 1900 BEAULARD, F. *Ann. Université de Grenoble*, 1900, t. XIII; *Journal de Physique*, 1900, 3^e série, t. IX. — Etudie un condensateur en diélectrique. Constate que pour une période très longue les pertes d'énergie sont nulles.
- 26) 1900 PELLAT et BEAULARD. De l'énergie absorbée par un condensateur soumis à une différence de potentiel périodique; *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1900, vol. 130, p. 1457. — Théorie sur condensateurs à un seul diélectrique sur lequel agit une force électrique périodique.
- 27) 1900 POTTS, L.-M. Measurement of electric absorption and hysteresis. *American Journal of Science*, août 1900, t. X, p. 91-114. — Mesure faite avec un électrodynamomètre sur montage en pont.
- 28) MORDEY, W. H. Capacity in alternating-current working; *The Electrician*, 18 janvier 1901. — Discussion générale sur le fonctionnement du diélectrique des câbles employés en courant alternatif. Résultats de mesures des pertes d'énergie dans les diélectriques de câbles.
- 29) 1901 STEINMETZ, C.-P. Some notes on dielectric losses. *Electrical World*, juin 1901, p. 1065. — Etudie condensateur en papier paraffiné. Trouve que la capacité a une valeur constante, que les pertes sont proportionnelles au carré de la tension, que les pertes par cycle sont proportionnelles au carré du champ électrique. Est d'opinion que l'hystérésis diélectrique existe, mais que les pertes sont en partie dues aux mouvements de globules d'air dans la masse du corps.
- 30) 1902 SKINNER, C.-E. Energy losses in commercial insulating materials when subjected to high potential stresses. *Amer. Institute of Electrical Eng.*, 1902, N° 1, p. 1047. — Etudie différentes matières au moyen du calorimètre et du wattmètre en fonction de la fréquence, de la température et de la tension.
- 31) 1902 MERCANTON, P.-L. Contribution à l'Etude des pertes d'énergie dans les diélectriques. Édité par Corbaz et Cie, Lausanne, 1902. — Etude historique. Etablit cycles d'hystérésis, par méthode du point, de paraffine mélangée avec différents corps conducteurs et isolants. N'a pas pu trouver de formule simple pour exprimer les pertes en fonction du potentiel.
- 32) 1902 SCHWEIDLER, E. Conductivity and polarisation in dielectrics. *Science Abstracts*, 1903, vol. 6, N° 919; *Sitzungsberichte der Kais. akad. Wein*, 1902, vol. III, p. 579.
- 33) 1905 CORBINO, O.-M. Viscosité diélectrique des condensateurs. *Eclairage électrique*, mai 1905, p. 227-230; *Nuovo Cimento*, 1905, vol. 9, p. 81. — Etudie papier paraffiné. Utilise arc chantant comme source d'énergie. Relève courbe au tube de Braun. Trouve 3° d'angle de phase à 1 900 périodes par seconde et 2° 10' à 3 640 périodes par seconde.
- 34) 1907 LAMPA, A. Dielectric hysteresis. *Science Abstracts*, 1907, vol. 10 A, N° 1055; *Sitzungsberichte der Kais. akad. Wein*, 1906, vol. 115, p. 1659. — Prétend que si

l'hystérésis diélectrique existe, elle doit être de nature visqueuse et indépendante de l'histoire du corps.

- 35) 1907 SAGNAC, G. Sur la théorie et la formule de Clausius. *Journal de Physique*, 1907, 4^e série, t. VI, p. 273.
- 36) 1907 MACLES, L. Recherche expérimentale sur les diélectriques solides. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1907, vol. 144, p. 264. — Trouve que la paraffine se conduit comme un diélectrique parfait. Pour les diélectriques solides (verre, mica, ébène), mis à l'abri des effets de pénétration, et de conductibilité, il observe surcharge et résidu.
- 37) 1907 MONACH, B. Des pertes dans les diélectriques. *Journal de Physique*, 1907, 4^e série, t. VII; *An. der Physik*, 1907, vol. 22, p. 905. Mesures au pont, téléphone optique. — Trouve que les pertes sont exactement proportionnelles au carré de la tension. Dans les câbles, les pertes sont proportionnelles à la fréquence.
- 38) 1907 SCHWEIDLER, E. Dielectric anomalies. *Sciences abstracts*, 1908, vol. 11 A, N° 650 ; *An. der Physik*, 1907, vol. 24, p. 711. — Théorie déduite de celle de Pellat.
- 39) 1907 GROVER, F.-W. Simultaneous measurement of capacity and power factor, of condensers. *Bulletin of the Bureau of Standards*, 1907, vol. 3, p. 371. — Description et discussion de divers montages en pont.
- 40) 1909 MACLES, L. Recherches sur les résidus diélectriques. *Journal de Physique*, 1909, 4^e série, t. VIII, p. 631. — Poursuit l'étude signalée plus haut. (1907).
- 41) 1909 EMANUELLI, L. Pertes dans les diélectriques. *Sciences abstracts*, 1909, vol. 12 B, N° 639 ; *Atti Dell'Asso. Elettrotecnica Italiana*, 1909, vol. 13, p. 23. — Trouve que les pertes sont proportionnelles au carré de la tension pour des gradients de potentiel compris entre 10 et 500 v/mm, elles sont proportionnelles à la capacité à condition que le diélectrique soit homogène. La surface du cycle d'hystérésis diminue lorsque la fréquence augmente. Dans certains cas, elles restent constantes ou même elles augmentent.
- 42) 1909 MADELUNG. Rigidité diélectrique dans les gaz très raréfiés. *Journal de Physique*, 1909, 4^e série, t. VIII, p. 507. — Recherches au moyen du tube de Braun.
- 43) 1910 BEAULARD et MAURY. Absorption de l'énergie électrique par un milieu diélectrique. *Journal de Physique*, 1910, 4^e série, t. IX, p. 39.
- 44) 1910 CURTIS. Mica condensers as standards of capacity. *Bull. of Bureau of Standards*, 1910, vol. 6, N° 4, p. 431. Etude très étendue sur les condensateurs au mica. L'auteur prétend que l'absorption due à la non homogénéité n'est qu'une faible partie de l'absorption totale.
- 45) 1910 HOCHSTADTER. Dielectric losses in high tension cables. *Science abstracts*, 1910, N° 558, p. 243 ; *Die Dielektrischen eigenschaften moderner Hochspannungskabel mit Rücksicht auf die Verwendung von Kabeln ur Spannungen über 20 000 v.* ; *E. T. Z.*, 1910, p. 467. — Etude très importante sur les câbles électriques. L'auteur établit la courbe d'hys-

térésis par l'intermédiaire de relevés oscillographiques. Il trouve que les pertes sont exactement proportionnelles à la fréquence, et qu'elles augmentent un peu plus que proportionnellement au carré de la tension. Il trouve un minimum de pertes à une température de 40° et pas de trace de viscosité ou de polarisation dans les câbles isolés au papier.

- 46) 1911 GROVER, F.-W. Measurements on paper condensers. *Bull. of the Bureau of Standards*, 1911, p. 495. — Etude les condensateurs isolés au papier, de plusieurs fabricants, américains et européens. Trouve que la capacité et l'angle de phase ne varient pas suivant une loi simple en fonction de la température et de la fréquence. Il trouve des angles de phase qui varient de 6° à 22° . Intéressante discussion et comparaison entre les théories de Maxwell, Pellat, Schweidler, etc. Conclut que seule la théorie de Schweidler s'accorde quantitativement avec les résultats trouvés.
- 47) 1912 DÉCOMBE, L. Théorie électronique des phénomènes diélectriques résiduels. *Journal de Physique*, 1912, 5^e série, t.II, p. 181. — Etude théorique. Est conduit à attribuer la « chaleur de Siemens » à une viscosité propre de l'atome.
- 48) 1912 RAYNER, E.-H. High voltage tests and energy losses in insulating materials. *Journal of the Inst. of Elect. Eng.*, 1912, p. 3. — Dans une première partie, l'auteur étudie la rigidité. Dans la deuxième partie, il donne le résultat de mesures faites au moyen du wattmètre électrostatique, sur certains isolants industriels. Il donne une bibliographie très complète de 18 pages.
- 49) 1912 FLEMING et DYKE. On the power factor and conductivity of dielectrics when tested with alternating currents of telephonic frequency at various temperature. *Journal of the Inst. Elect. Eng.*, 1912, p. 323. — Essais de plusieurs matières isolantes. Pertes mesurées par une méthode de pont. Nombreuses courbes et tableaux. Discussion de la méthode de mesure et des résultats.
- 50) 1916 GRUNBERG, M. Verluste im Dielektrikum technischer Kondensatoren. Edité par J. Springer, Berlin, 1916. — L'auteur utilise l'électromètre pour étudier le mica, le verre et le papier. Il trouve que les pertes augmentent un peu plus vite que le carré de la tension, qu'elles sont proportionnelles à la fréquence et qu'elles augmentent rapidement avec la température. Les pertes dans le verre sont plus grandes et moins stables que celles dans le mica.
- 51) 1917 SKINNER, C.-E. Dielectric losses in insulating materials. *Journal of the Franklin Institute*, 1917, vol. 183, p. 667. L'auteur utilise un wattmètre électrostatique à quadrants de construction spéciale. Il mesure les pertes dans les matières diverses et dans certains appareils industriels : transformateurs, bornes pour haute tension, etc. Il constate que les pertes en fonction de la tension peuvent s'exprimer par une exponentielle. Des mesures faites sur des échantillons différents d'un même corps peuvent

différer entre elles plus fortement que celles qui sont faites sur des corps différents.

- 52) 1917 CLARK et SHANKLIN. Insulation characteristics of high tension cables. *Trans. American Inst. of Elect. Eng.*, 1917, vol. XXXVI, p. 447. — Mesure à l'électrodynamomètre avec circuit compensé. Essai matière d'imprégnation et câbles. Nombreuses courbes.
- 53) 1917 BANG et LOUIS. The influence of dielectric losses on the rating of high tension underground cables. *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, 1917, vol. XXXVI, p. 431. — Mesures industrielles sur câbles électriques installés dans une conduite, dans le but de déterminer les conditions maxima admissibles pour le fonctionnement.
- 54) 1918 FARMER. Dielectric power losses. *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, 1918, vol. XXXVII, p. 222. — Mesures faites par méthode des trois wattmètres sur câble triphasé de 3 m de longueur. — L'auteur trouve que les pertes varient suivant une exponentielle en fonction de la température et de la tension.
- 55) 1918 SOLERI, E. Le intensita di corrente ammissibili nei cavi ad alta tensioni. *L'Elettrotecnica*, fév. 1918, vol. 5, p. 54 et 75. — Analyse des travaux d'autres expérimentateurs. L'auteur mesure les pertes sur un câble de 20 m de longueur : pertes dans le cuivre, dans l'isolant. Calcul de l'intensité du courant maximum admissible.
- 56) 1919 BOUZON. Etude des diélectriques industriels. *Revue générale de l'Electricité*, 1919, t. VI, p. 137 et 181. — L'auteur étudie la rigidité diélectrique, résistance d'isolement, capacité inductive spécifique et pertes d'énergie. Discussion générale.
- 57) 1920 RENNESSON, G. Sur les pertes d'énergie dans les diélectriques des câbles industriels. *Revue générale de l'Electricité*, 1920, t. VII, p. 579. — Mesures faites au moyen d'électrodynamomètre de construction spéciale. L'auteur étudie les pertes en fonction de la température et de la tension. Il remarque l'inconstance du phénomène et trouve un minimum de pertes pour 30°.
- 58) 1921 GRANIER, J. Sur le tracé des cycles de viscosité diélectrique. *Revue générale de l'Electricité*, 1921, t. X, p. 219. L'auteur établit des courbes d'hystérésis par la méthode du point avec galvanomètre balistique. Il étudie le mica, la paraffine et le pétrole. Il trouve que sous une tension sinusoïdale, les cycles sont elliptiques et que certains condensateurs ne présentent aucune viscosité.
- 59) ARMAGNAT, H. Wattmètres. *Encyclopédie Electrotechnique*. Edité par L. Geisler, Paris.
- 60) LAWS, F.-A. *Electrical Measurements*. Edité par Mc Graw-Hill, New-York.
- 61) DE LA GORCE. Détermination des harmoniques. *Bull. Soc. franç. des Electriciens*, 1914, p. 545.
- 62) JANET, P. *Leçons d'électrotechnique générale*, vol. I. Edité par Gauthier-Villars, Paris.
- 63) BOUASSE, H. *Cours de Magnétisme et d'Electricité*, 3^e partie. (Etude du champ électrique.) Edité par Delagrave, Paris.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

La production de l'Ozone

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 7 juin 1922.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
M. MOLLIARD.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris.

Pour le Recteur :

L'Inspecteur d'Académie,

Th. LECONTE.

